

Riku Varis

## Kehäradan pohjaimellisten vaihteiden monitorointi





Riku Varis

# Kehäradan pohjaimellisten vaihteiden monitorointi

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 66/2018

Liikennevirasto  
Helsinki 2018

*Kannen kuva: Riku Varis*

Verkkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-752-9

Liikennevirasto  
PL 33  
00521 HELSINKI



**Riku Varis: Kehäradan pohjaimellisten vaihteiden monitorointi.** Liikennevirasto. Helsinki 2018. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 66/2018. 50 sivua ja 2 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-752-9.

**Avainsanat:** pohjain, monitorointi, painuma, kehärata

## Tiivistelmä

Tässä raportissa keskitytään Kehäradan Asolaan asennettujen pohjaimellisten vaihteiden käyttäytymisen seurantaan. Pää tavoitteena on tutkia mittausten avulla mahdollisimman kattavasti pohjainten vaikutusta suomalaisen vaihderakenteen käyttäytymiseen sekä lyhyellä että pidemmällä aikavälillä. Koekohteina toimii kaksi pohjaimellista ja kaksi pohjaimetonta vaihdetta, joissa kaikissa on käytännössä sama liikennemäärä.

Luvussa 2 esitellään valittujen koekohteiden ominaisuudet sekä tuodaan esille Euroopassa aikaisemmin tehtyjä tutkimuksia, joka on osoittanut pohjaimista olevan oikein käytettynä hyötyä ratarakenteen kuormitusten tasaamisessa ja elinkaaren lisäämisessä varsinkin vaihteen kaltaisissa erikoisrakenteissa. Tästä syystä niiden käyttöä vaihdealueella on syytä tutkia myös Suomessa.

Luku 3 keskittyy koevaihteiden monitorointijärjestelyihin. Monitoroinnin pääpaino on selkeästi radan pystysuuntaisen painumakäyttämisen selvittämisessä, joka nähtiin projektin alussa merkittävimmäksi muuttujaksi. Painumakäyttämisen analysoinnissa otettiin huomioon sekä junaylitysten aikainen palautuva painuma sekä pidempi-aikainen pysyvä painuma. Näitä kumpaakin mitattiin sekä pistemäisellä että jatkuvalla menetelmällä. Lisäksi vaihteista monitoroitiin kiskojen kulumista, risteysalueen pölkyn rasitustasoja sekä pohjainten vaikutusta sepelikerroksessa syntyvään värähtelyyn.

Vaihteista saadut mittaustulokset osoittavat, että tiettyjä eroja on havaittavissa pohjaimellisten ja pohjaimettomien vaihteiden välillä. Junan ylitysten aikaisissa palautuvan painuman tuloksissa havaittiin pohjaimellisella radalla hieman enemmän vaihtelua eri mittausten välillä, joka kertoo pohjaimen elastisesta ja lämpötilariippuvaisesta vaikutuksesta. Pohjaimien elastisuus johtaa siihen, että tällä raiteella ei ole muodostunut yhtä paljon pistemäisiä ongelmakohtia, eli kokonaisuutena se toimii pohjaimetonta rakennetta paremmin junakuormien alla.

Raiteiden pysyvän painuman suhteen rakenne-erojen vaikutus näkyi vieläkin selkeämmin. Pohjaimellisissa vaihteissa syntyi ensimmäisten kuukausien aikana selkeästi enemmän painumaa kuin pohjaimettomissa vaihteissa, koska pohjaimen ja sepelin välisen tehokkaan kontaktin muodostuminen ja pohjaimen asettuminen ei tapahdu hetkessä. Pohjaimen asettumisen jälkeen tilanne kääntyi, ja seuraavalla vuoden seuranta-jaksolla painumat olivat jo isommat pohjaimettomassa rakenteessa. Kaikki koevaihteet tuettiin puolentoista vuoden käytön jälkeen, joka muutti tilanteen jälleen kohti alkupeleistä, jonka jälkeen pohjaimellisen ja pohjaimettoman rakenteen välillä ei enää havaittu selkeitä eroja. Tukeminen vaikutti selkeästi myös risteysalueen pölkystä mitattuihin rasitustasoihin, jolloin pohjaimen vaikutuksia pidemmällä aikajänteellä ei pystytty yksikäsitteisesti analysoimaan.

Kiskoprofiilien mittaukset osoittivat, että pohjaimilla ei ole tässä koekohteessa suurta vaikutusta kiskojen kulumiseen. Muutamassa vaihteessa havaittiin profiilimittauksissa pientä kiskon ja tukikiskon välistä korkeuseroa, mutta tämä ilmiö toistui sekä pohjaimellisessa että pohjaimettomassa rakenteessa, joten se ei liity suoraan pohjaimen ominaisuuksiin.

Tukikerroksen kiihtyvyyssmittauksissa kävi ilmi, että koekohteeseen valittu pohjain lisää hieman rakenteen pystysuuntaista värähtelyä suoraan raiteen alla. Etukäteen pohjaimen yhtenä vahvana ominaisuutena pidettiin kykyä vähentää värähtelyä ja siitä syntyvää runkomelua läheisissä rakenteissa. Nämä mittaukset kuitenkin osoittivat, että värähtely saattaa jopa lisääntyä, kun käytetään jäykkää pohjainta, kuten tässä koekohteessa.

**Riku Varis: Monitoring of the turnouts with under sleeper pads in Ring Rail Line.** Finnish Transport Agency. Helsinki 2018. Research reports of the Finnish Transport Agency 66/2018. 50 pages and 2 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-652-9.

## Summary

This report concentrates on monitoring the behavior of turnouts with under sleeper pads (USP) in Ring Rail line. The main goal of this study is to measure the influence of the USP on the basic structure of Finnish turnouts in short and especially in longer time span. The monitoring area includes two turnouts with under sleeper pads and two turnouts without. All of these turnouts have the same traffic amount.

Chapter 2 introduces the basic features of all test turnouts and also brings up the research outputs from previous studies done in Europe. These studies shows, that when used in a right way, under sleeper pads could be really beneficial solutions for equalizing the loads in ballast layer and that way extending the life cycle especially in special structures like turnouts. For that reason, studies exactly in turnout area are justified also in Finland

Chapter 3 concentrates on the monitoring setup. Monitoring clearly emphasize to the vertical deflection and movements of the track structure, which was seen as the most relevant variable concerning the behavior of under sleeper pads. The vertical behavior of the track was analyzed in two different way. One part of the measurements focused on the rapid recoverable vertical displacement under the train loads and other part of the measurement concentrated on the slow settlement of the track structure. Both of these parameters was measured with continuous and stationary methods in every turnout. Besides those, monitoring setup also included the measuring of rail wear, stress of the bearers in crossing area and vibration levels in ballast layer.

The measurements results reveals that certain differences can be found between USP- and non-USP-structure. Results from recoverable vertical displacement shows that under sleeper pads creates more fluctuation between different measurements, which represents the under sleeper pads elastic and temperature-depended effect. The elasticity of USP leads to situation, where the small individual weak spots of vertical displacement has not been formed as in conventional structure. That means structure with under sleeper pads is operating better under the train loads.

The effect of under sleeper pads was even clearer when analyzing the settlement of these two different solutions. Turnouts with USP creates more settlement during the first couple of months, because it takes time to form the effective contact between sleepers and ballast. After these couple of months, the situation changed and the settlement started to decrease a little bit, while non-USP turnouts continued to settle. Unfortunately for this monitoring session, all the test turnouts were tamped after 1,5 years, which chanced the situation again. After the tamping, no difference in the settlement was found between USP-structure and non-USP-structure. The tamping procedure also affected to the stress levels of the crossing bearers and for that reason, long term behavior about those stresses was unable to concluded.

The rail profile measurements revealed that under sleeper pads are not affecting the wear rates of the rails in these turnouts. In switch areas, few switch blades were little bit higher than stock rail, but this phenomenon was noticed in both type of structure, so it probably has nothing to do with under sleeper pads.

Acceleration results from ballast layer proved that the selected under sleepers pads increase the vertical vibration directly under the track. Before the measurements, the common belief was that under sleeper pads should decrease the vibrations and ground borne noise in buildings close by. However, these measurements showed that at least rather stiff under sleeper pads, which was used in this test area, could increase the vibration levels.

# Esipuhe

Tämä raportti liittyy Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Rakennustekniikan laboratoriossa, Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä tehtyyn tutkimukseen, jonka Liikennevirasto on tilannut osana rahoittamaansa Elinkaaritehokas rata –tutkimusohjelmaa.

Tutkimuksen vastuushenkilöinä on yliopistolla ollut Riku Varis ja työtä on ohjannut Heikki Luomala. Liikenneviraston yhteyshenkilöinä asiaan liittyen ovat toimineet Tuomo Viitala, Tuija Myllymäki sekä Markku Nummelin.

Helsingissä joulukuussa 2018

Liikennevirasto  
Ratatekninen yksikkö



# Sisällysluettelo

1	PROJEKTIN TAUSTA JA TAVOITTEET.....	9
2	MONITOROINTIKOhteet.....	10
3	MONITOROINTIJÄRJESTELYT KOEVAIhteissa.....	13
3.1	Radan palautuvan painuman mittaaminen.....	13
3.1.1	Jatkuva menetelmä.....	13
3.1.2	Pistemäinen menetelmä.....	15
3.2	Radan pysyvän painuman mittaaminen.....	17
3.3	Risteysalueen pölkyn rasiustilan mittaaminen.....	18
3.4	Kiskojen ja risteysalueen kulumisen ja muodonmuutosten mittaaminen.....	19
3.5	Tukikerroksen värähtelyn mittaaminen.....	21
4	MITTAUSTULOKSET JA ANALYSOINTI.....	23
4.1	Radan palautuva painuma.....	23
4.2	Radan pysyvä painuma.....	30
4.3	Risteysalueen pölkyn taipuma.....	37
4.4	Kiskojen ja risteysalueen kuluminen ja muodonmuutokset.....	38
4.5	Tukikerroksen värähtelyn mittaaminen.....	44
5	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMET.....	47
LIITTEET		
Liite1	Antuointisuunnitelma radan pystysuuntaisen painuman mittaamiseen	
Liite 2	Radan pysyvä painuma aikavälillä 6/2015–5/2017	

# 1 Projektin tausta ja tavoitteet

Suomen rataverkolla käytettävien vaihteiden rakenne on nykyisellään melko jäykkä. On kuitenkin huomattu, että tämä jäykkyys rasittaa vaihderakennetta ja varsinkin sen alla olevaa tukikerrosta. Vaihderakenteen jäykkyyden ansiosta tukikerrokseen kohdistuu pölkkyjen kautta merkittävää dynaamista kuormitusta, joka pitkällä aikavälillä hienontaa sepeliä ja heikentää sen tukemiskykyä.

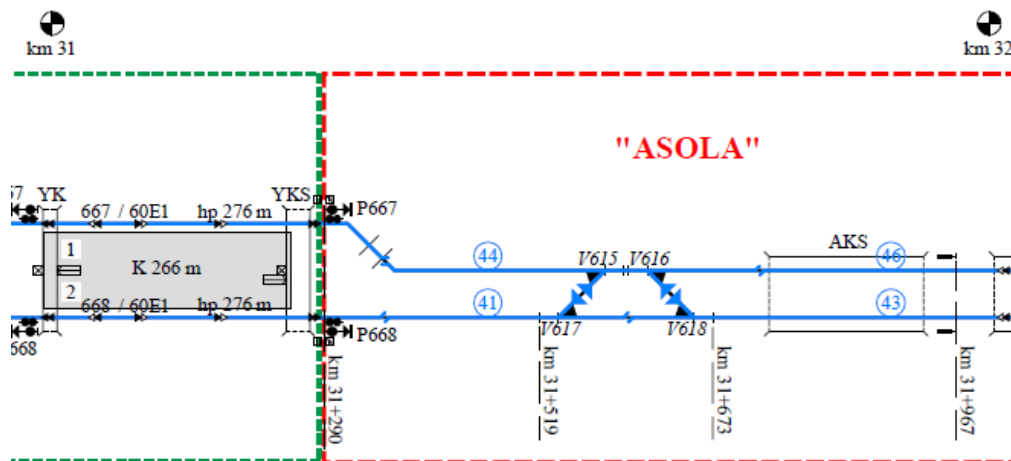
Jotta tällaisista ongelmista päästäisiin tulevaisuudessa eroon, on kehitettävä ja testattava uusia rakenneratkaisuja. Kehäradan rakennusprojektin yhteydessä testattiin yhtä tällaista ratkaisua asentamalla kahteen vaihteeseen pohjaimet. Pohjain on pölkyn alapintaan asennettava joustoelementti, jonka avulla pyritään parantamaan sepelitukikerroksellisen päällysrakenteen pysyvyyttä sekä runkomelun eristystä. Pohjain pyrkii parantamaan sepelitukikerroksen pysyvyyttä nimenomaan vähentämällä raidesepelin kulumista. Normaalissa sepeliraiteessa pölkyn alapinnan kosketuspinta-ala suhteessa raidesepelin teräväreunaisiin kivirakeisiin on 5–9 prosenttia. Pohjaimen avulla kosketuspinta-alaa on mahdollista kasvattaa jopa 35 prosenttiin. Tällainen kuormituksen ja kautuminen laajemmalle pinta-alalle vähentää pölkyn ja sepelitukikerroksen jauhautumista kontaktipinnassa ja parantaa raiteen pysyvyyttä, jolloin koko tukikerroksen rasi-tustila pienenee. Rakenteen elastisuuden ja pölkyn alapinnan kosketuspinta-alan lisääntyminen edesauttaa myös tärinän vähentymistä ja tätä kautta runkomelun eristystä.

Pohjaimia on testattu ympäri maailmaa jo useita vuosia ja tulokset ovat osoittaneet niiden toimivuuden. Suomessa pohjaimia on kuitenkin testattu hyvin vähän, jolloin kokemuksia sen ominaisuuksien soveltuvuudesta meidän ratarakenteeseen ei ole. Tämän työn päätavoitteena onkin tutkia mittausten avulla mahdollisimman kattavasti pohjainten vaikutusta suomalaisen vaihderakenteen käyttäytymiseen sekä lyhyellä että pidemmällä aikavälillä. Näihin asioihin pureudutaan mittaamalla ratarakenteen palautuvaa painumaa sekä pysyvää painumaa ja lisäksi pölkyn rasi-tustasoja ja tukikerroksen värähtelyjä. Samalla tutkitaan myös, vaikuttaako pohjainten käyttö välillisesti kiskon kulumiseen.

## 2 Monitorointikohteet

Jotta pohjainten vaikutuksia voitaisiin arvioida mahdollisimman tehokkaasti, täytyy valita hyvät monitorointikohteet. Vaikutusten arvioinnin kannalta merkittävin tekijä mittauksille oli lähtökohtaisesti se, että vaihteita pitää olla useampia ja mittauksia pitää pystyä suorittamaan luonnollisesti sekä pohjaimellisesta että pohjaimettomasta vaihteesta. Lisäksi näiden kaikkien vaihteiden tulisi sijaita mahdollisimman samanlaisissa oloissa, eli ratapenkereen rakenne ja vaihteiden kuormitus tulisi olla mahdollisimman homogeeninen.

Näiden vaatimusten pohjalta pohjaintestit päätettiin toteuttaa aivan Kehäradan itäpäässä Asolan puolenvaihtopaikalla vaihteissa V615, V616, V617 ja V618. Vaihteiden sijainnit ja numerot on esitetty alla olevassa Kehäradan itäpään raiteistokaaviossa (kuva 1). Koko rataosuus oli siis testin alkaessa täysin uusi, joten ratapenkereen ominaisuudet olivat täysin identtiset ja näin ollen ihanteelliset mittauksia varten. Tämä alkuosuus Kehäradasta on lisäksi toteutettu täysin normaalina sepelitikkerroksellisenä rakenteena ennen pitkää tunnelia, jonka katsottiin olevan etu, koska pohjainten ominaisuuksia haluttiin testata nimenomaan mahdollisimman normaaleissa oloissa.



Kuva 1. Asolan raiteistokaavio. (Liikennevirasto 2014a)

Kuten kuva 1 osoittaa, raiteenvaihtopaikalla vaihteita on siis useita pienellä alueella, jolloin erilaisten rakenteiden testaus ja vertailu on helppo toteuttaa. Vaihteet asennettiin siten, että eteläisen raiteen vaihteet V617 ja V618 varustettiin pohjaimilla ja pohjoisen raiteen vaihteet V615 ja V616 asennettiin normaalilla pohjaimettomalla rakenteella. Tällä tavalla saadaan aikaan riittävän pitkä yhtämittainen pohjaimellinen rakenne, jota voidaan vertailla suoraan vieressä olevaan yhtä pitkään normaalirakenteeseen, jossa on suoraan ajettaessa aina yksi myötävaihde ja yksi vastavaihde. Lisäksi kummallakin raiteella liikkuu täysin identtinen Sm5-junakalusto, joten kuormitusmäärät eri vaihteille ovat hyvinkin lähellä toisiaan. Ennen säännöllisen liikenteen alkamista vaihteita on tosin käytetty Kehäradan rakennustöiden yhteydessä, joten vaihteet eivät ole täysin kuormituksettomia mittauksen alkaessa.

Pölkkyihin asennettujen pohjainten yleisistä ominaisuuksista on kerrottu hyvinkin kattavasti Luomala et al. (2015) tekemässä Liikenneviraston julkaisussa, joka käsittelee laajasti radan kokonaisjäykkyyttä ja sitä kautta pohjainta yhtenä sen osatekijänä. Kyseisessä raportissa esitellään pohjainten valmistusmateriaalit, kiinnitystavat, testausstandardit sekä normaalit jäykkyyksalueet. Samassa käydään myös läpi, minkälaisia tutkimustuloksia muissa maissa on saatu pohjainten vaikutuksista niin linjaosuuksilla kuin vaihteissakin. Nämä tutkimukset osoittavat, että vaihdealueella on muuttuvan pölkkypituuden ja kiskon epäjatkuvuuskohtien takia kokeiltu myös pohjainten optimointia, eli materiaalin ja sen paksuuden muokkaamista siten, että radan kokonaisjäykkyys pysyisi mahdollisimman samana koko vaihdealueen läpi. Suomessa kokeemukset pohjainten vaikutuksista ovat kuitenkin vielä hyvin olemattomat, varsinkin vaihteissa, joten tällaiseen optimointiin ei haluttu ainakaan vielä tässä vaiheessa lähteä.

Eteläiselle raiteelle asennetut pohjaimet ovat kaikki Getznerin valmistamia Sylomer SLB 3007 G-tyypin pohjaimia, joiden kokonaispaksuus kiinnitysrakenteensa kanssa on yhteensä 12 mm. Tästä noin 7 mm on varsinaista elastista materiaalia, jonka staattinen jäykkyys on valmistajan arvioiden mukaan  $c_{stat} = 0,3 \text{ N/mm}^3$  (Getzner 2010). Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että  $1 \text{ mm}^2$  alueelle kohdistettu  $0,3 \text{ N}$  kuormitus saa pohjaimessa aikaan  $1 \text{ mm}$  puristuman. Virallisia jäykkyyksluokituksia pohjaimille ei ole määritetty, mutta Auer et al. (2013) on työssään arvioinut, että pohjain voidaan kategorisoida jäykäksi, jos se jäykkyys ylittää  $0,25 \text{ N/mm}^3$ . Asennetut pohjaimet ovat siis kohtalaisen jätkeä, jolloin niiden parhaat ominaisuudet tulevat esiin juuri geometrian pysyvyyden parantamisessa ja jäykkyyserojen tasoittamisessa (Auer et al. 2013).

Pohjainvalmistaja Getzner on omissa testeissään arvioinut, että pohjainta käyttämällä pölkyn ja sepelin välinen kontaktipinta-ala kuormituksen aikana saattaa olla jopa 30 % pölkyn pohja-alasta, joka 2,6 metrisen vaihdepölkyn tapauksessa tarkoittaa noin  $0,19 \text{ m}^2$  aluetta. Jos kontaktialue on tämän kokoinen, lopullinen pohjaimen jäykkyys voidaan ilmoittaa materiaalin jousivakiona  $k_{30} = 57 \text{ kN/mm}$ . Jos kontaktialue on vain puolet tästä, eli 15 prosenttia, pohjaimen jäykkyydeksi tulee  $k_{15} = 28,5 \text{ kN/mm}$

Pohjaimella on näin ollen ainakin teoriassa merkittävä vaikutus radan pystysuuntaiseen kokonaisjäykkyyteen varsinkin vaihteissa, jossa muita elastisia materiaaleja ei kielisovitusalueella tai risteyskärjen alla käytetä. Näillä alueilla rakenteen pystysuuntainen kokonaisjäykkyys riippuu siis käytännössä kokonaan pölkyn alapuolisen rakenteen jäykkyydestä. Peltokangas et al. (2013) on mitannut pölkyn alapuolisen rakenteen jäykkyyttä ilman pohjainta ja näiden mittausten perusteella on muodostettu karkeat jäykkyyksluokat elastiselle, normaalille ja jäykälle radalle, jotka on esitetty taulukossa 1. Pölkyn jäykkyyksilukojen perusteella voidaan arvioida myös pohjaimellisen rakenteen jäykkyyttä kahdella äsken esitetyllä pölkyn ja sepelin välisellä kontaktipinta-alalla.

*Taulukko 1. Pölkystä mitatun jäykkyyden raja-arvot ilman pohjainta ja pohjaimen kanssa, kun pohjaimen ja sepelin väliseksi kontaktipinta-alaksi on määritetty 30 prosenttia tai 15 prosenttia.*

	Pölkystä mitattu radan pystysuuntaisen jäykkyys ilman pohjainta	Pölkyn arvioitu pystysuuntainen jäykkyys pohjaimen kontaktipinta-alan ollessa 30 %	Pölkyn arvioitu pystysuuntainen jäykkyys pohjaimen kontaktipinta-alan ollessa 15 %
<b>Elastinen rata</b>	25 kN/mm	17 kN/mm	13 kN/mm
<b>Normaali rata</b>	100 kN/mm	36 kN/mm	22 kN/mm
<b>Jäykkä rata</b>	900 kN/mm	53 kN/mm	28 kN/mm

Kuten taulukosta 1 voidaan havaita, pohjainten käytöllä on merkitystä. Elastisella radalla vaikutus on ymmärrettävästi pienempi, kun tukikerroksen ja pohjamaan jousto-ominaisuudet mahdollistavat jo valmiiksi merkittäviä pystysuuntaisia liikkeitä ja pohjain on käytännössä muuta rakennetta jäykempi elementti. Silti pölkyn alapuolisen rakenteen jäykkyys voi tippua jopa puoleen alkuperäisestä pohjaimettomasta tilanteesta. Normaalilla radalla jäykkyys voi tippua jopa 20 prosenttiin siitä, mitä se olisi ilman pohjainta, jolloin radan jouston määrä lisääntyy teoriassa viisinkertaiseksi samalla kuormituksella. Jäykällä radalla, kuten esimerkiksi kallioleikkauksissa tai silloilla, pölkyn alapuolisen rakenteen pystysuuntainen jäykkyys tippuu noin 5 prosenttiin alkuperäisestä, eli muutos on ihan dramaattinen. Tällaisilla jäykillä alueilla ja varsinkin normaalin radan ja jäykän radan siirtymäalueilla pohjaimista saadaan siis irti suurin hyöty. Normaalilla linjaraitteella kiskon ja pölkyn välissä käytettävä elastinen välilevy (jäykkyys noin 100 kN/mm) tasaa osaltaan näitä taulukossa 1 näkyviä jäykkyyseroja, eli muutokset ei ratarakenteen kokonaisjäykkyyden osalta näytä linjaosuuksilla aivan näin dramaattiselta. Mutta vaihdealueella taulukon 1 arvot ovat siis hyviä arvioita koko rakenteen jäykkyydestä, kun välilevyjä ei kaikkialla käytetä.



## 3 Monitorointijärjestelyt koevaihteissa

Uusien pohjainvaihteiden vaikutuksia ratarakenteen toimintaan on tässä projektissa monitoroitu muutamalla eri tavalla. Monitoroinnin pääpaino on selkeästi radan pystysuuntaisen painumakäyttäytymisen selvittämisessä, joka nähtiin projektin alussa merkittävimmäksi muuttujaksi. Pystysuuntaisen painumakäyttäytymisen lisäksi vaihteista monitoroitiin myös kiskojen kulumista, risteysalueen pölkyn taipumaa sekä pohjainten vaikutusta sepelikerroksessa syntyvään värähtelyyn. Seuraavissa alaluvuissa kerrotaan yksityiskohtaisemmin näistä monitorointijärjestelyistä.

### 3.1 Radan palautuvan painuman mittaaminen

Yksi merkittävimmistä rakenteen pystysuuntaisen kokonaisjäykkyyden arviointikeinoista on radan palautuvan painuman mittaaminen. Radan palautuvalla painumalla tarkoitetaan radan pystysuuntaista liikettä kuormituksen alaisena, joka palautuu, kun kuorma on ylittänyt kyseisen mittauskohdan. Tällä niin sanotulla radan joustolla on suora yhteys radan jäykkyyteen ja jouston liiallinen kasvu vaihteen elinkaaren aikana indikoi näin ollen myös radan yleisen kunnon heikkenemistä. Tällä palautuvalla painumalla on hyvin suora yhteys myös radan pysyvään painumaan, jonka mittaamisesta kerrotaan lisää kappaleessa 3.2.

Radan palautuvaa painumaa voidaan mitata sekä jatkuvalla että pistemäisellä menetelmällä. Koska ratarakenteen palautuvan painuman mittaaminen on hyvin olennainen asia radan jäykkyyden arvioinnissa, mittaus päätettiin toteuttaa kummallakin näistä menetelmistä.

#### 3.1.1 Jatkuva menetelmä

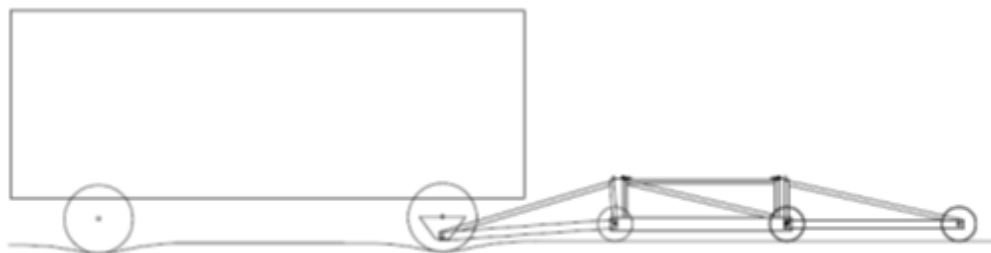
Radan palautuvan painuman jatkuva mittaaminen toteutettiin TTY:llä kehitellyn jäykkysmittalaitteen avulla, joka on esitetty kuvassa 2. Tämä mittalaite on suunniteltu siten, että se pystytään etupäästään kiinnittämään suoraan Tka7- ratakuorma-auton akseliin, jolloin Tka7 toimii vaunun vetokalustona ja rataa kuormittavana kuormana mitauksessa.



Kuva 2. TTY:llä kehitetty radan palautuvaa painumaa mittaava laite.

Mittalaitteen toiminta perustuu radan pystysuuntaisen geometrian mittaamiseen sekä kuormittamattomasta että kuormitetusta radasta. Kuten kuvasta 2 voidaan nähdä, mittalaite koostuu kolmesta kevyestä akselistä, jotka mittaavat radan pystysuuntaisen geometrian ensin TKA 7-ratakuorma-auton tuottaman akselikuorman (noin 14 tonnia) alaisena ja tämän jälkeen kuormittamattomana (mittalaitteen oma akselipaino noin 150 kg). Radan taipuma saadaan selville näiden kahden mittaustuloksen erotuksena, jonka avulla päästään kiinni radan kokonaisjäykkyyteen. Saman tyyppisiä jäykkyyden mittaamenetelmiä on käytetty myös esimerkiksi Sveitsissä (Berggren 2009).

Mittauslaitteen kaksi ensimmäistä akselia toimivat referenssipisteinä radan kuormitetua pystysuuntaista geometriaa määritettäessä. Kuormittamaton geometria määritetään vastaavasti mittalaitteen ensimmäisen akselin suhteen toisen ja kolmannen akselin toimiessa referenssipisteinä. Näin saadaan aikaiseksi kaksi suhteellista korkeusviivaa, jotka on mitattu akselivälin (3 m) pituuden verran eri kohdissa. Jotta näitä korkeusviivoja voidaan vertailla keskenään, mittaustulokset sidotaan tarkasti paikkaan. Tämä tehdään pyörän pyörimistä mittaavan pulssianturin avulla. Paikkaan sidottu kuormittamattoman geometrian signaali on helppo siirtää vakiomatkan verran eteenpäin siten, että eri korkeusviivojen lukuarvot edustavat samaa paikkaa. Kuva 3 havainnollistaa mittalaitteen eri osien toimintaa tilanteessa, jossa rataa aiheutuu palautuvaa painumaa vetokaluston raskaiden akseleiden vaikutuksesta.



Kuva 3. Periaatekuva jatkuvatoimisesta jäykkyyden mittalaitteesta. (Luomala et al. 2015)

Tämä jatkuvatoiminen jäykkyyden mittalaite on kehitetty osana radan kokonaisjäykkyyden mittaamista ja modifiointia käsittelevää projektia. Tämän projektin loppuraportissa on kerrottu yksityiskohtaisemmin laitteen ominaisuuksista ja radan painuman laskentatavoista. (Luomala et al. 2015)

Mittalaitteella tehtiin 4 mittausta, joista ensimmäinen toteutettiin jo ennen Kehäradan liikenteen aloittamista 16.6.2015. Tämän mittauksen ideana oli saada selville koekohdeiden alkutilanne alueen rakennusurakan jälkeen, johon jälkimmäisiä mittauksia voidaan tulevaisuudessa verrata. Koevaihteita oli siis jo ennen tätä ajankohtaa kuormitettu työmaaliikenteen johdosta, mutta nämä kuormitusmäärät ovat sen verran epämääräiset ja epätasaiset eri vaihteiden kesken, että mittausperiodi päätettiin aloittaa työmaaliikenteen loppumisen jälkeen. Toinen mittaus tehtiin 23.5.2016, eli noin vuosi liikenteen aloittamisen jälkeen. Kolmas mittaus toteutettiin 2.11.2016, jolloin pyrittiin pääsemään kiinni pohjaimen ominaisuuksiin jäisessä tukikerroksessa. Viimeinen mittaus toteutettiin vielä juuri ennen raportointia 23.5.2017, joka kertoo palautuvan painuman tilasta projektin päättyessä.

### 3.1.2 Pistemäinen menetelmä

Jatkuvaan mittaukseen kykenevän mittalaitteen ohella radan palautuvaa painumaa mitattiin tässä projektissa myös pistemäisellä menetelmällä. Pohjainvaihteissa uusia elastisia komponentteja on lisätty ainoastaan pölkyn alle, joten pistemäiset mittaukset keskittyivät pölkyn pystysuuntaisen siirtymän määrittämiseen suhteessa pohjamaahan. Pölkyn kylkeen kiinnitettävän siirtymäanturin avulla pölkyn liikkeitä pystyttiin vertaamaan tiiviiseen pohjamaahan asti kairattavaan referenssitankoon. Riittävän pitkällä (noin 3 m) tangolla voitiin varmistaa, että referenssitaso ei pääse liikkumaan merkittävästi vaihteen käytön aikana. Kuva 4 havainnollistaa kairatangon sijaintia ja siirtymäanturin kiinnitystä pölkyn päähän. Anturilla on tarkoitus seurata pölkyn joustokäyttäytymistä mahdollisimman pitkään, joten pölkkyyn on kiinnitetty myös anturia ja kairatankoa suojaava putki. Anturin ja sen vastinkappaleen asennuksen jälkeen putki suojataan vielä tiivistetyllä kannella.



Kuva 4. Pölkyn pystysuuntaista liikettä mittaava anturi ja sen referenssitasona toimiva kairatanko kiinnikkeineen.

Tämän tyyppisiä antureita asennettiin jokaiseen koevaihteeseen siten, että jokainen eri mittapiste löytyy sekä pohjaimellisesta että pohjaimettomasta vaihteesta. Mittapisteiksi valittiin yksi piste vaihteiden ulkopuolelta, yksi piste kielisovitusalueen kärjestä, yksi piste välikiskoalueelta sekä yksi mittapiste risteyskärjen kohdalta. Risteysaluetta lukuun ottamatta anturit asennettiin aina pölkyn kumpaankin päähän. Risteysalueella anturit asennettiin vuorostaan siten, että toinen anturi sijaitsi suoran reitin puoleisessa pölkypäädyssä ja toinen anturi risteyskärjen alla, kuten kuvassa 5 on osoitettu. Kaikkien siirtymäantureiden tarkka sijainti on osoitettu anturointisuunnitelmassa, joka on esitetty tämän raportin Liitteessä 1.



Kuva 5. Risteysalueen siirtymäanturin sijoittelu.

Nämä siirtymäanturit ovat ainoat pysyvät anturit radassa ja ne mittaavat todellisuudessa pääasiallisesti radan pysyvää painumaa tallentamalla kaikkien anturien arvon talteen kerran kolmessa tunnissa radalla asennetun automaattisen mittausjärjestelmän avulla. Samat anturit kykenevät kuitenkin myös nopeaan junan palautuvan painuman mittaamiseen, kun mittausjärjestelmä vaihdetaan nopeampaan. Antureita käytettiin siis kumpaankin tarkoitukseen ja junan ylityksien luomaa palautuvaa painumaa pystyttiin mittaamaan manuaalisesti aina erillisillä mittauskerroilla, joita kertyi projektin aikana yhteensä 4 kappaletta. Ensimmäinen manuaalinen palautuvan painuman mittaus toteutettiin marraskuussa 2015 ja sen jälkeen aina noin puolen vuoden välein projektin loppuun asti.

Näiden siirtymäanturien lisäksi palautuvaa painumaa mitattiin mittalaitteen ajojen yhteydessä myös kiihtyvyyssantureilla, jotka asennettiin magneettien avulla kiinni kiskon jalkaan, jolloin ne saatiin helposti pystyasentoon. Tämä oli hyvin tärkeää, sillä kyseiset kiihtyvyyssanturit kykenevät mittaamaan kiihtyvyyttä ainoastaan yhdessä suunnassa. Kiihtyvyyssantureita käytettiin kaikilla muilla mittauskerroilla paitsi kesäkuussa 2015, jolloin tallennettiin ainoastaan siirtymäanturien mittaamat palautuvat painumat.

Mittaus toteutettiin asentamalla pohjoisen raiteen linjaosuudelle vaihteen V617 viereen yhteensä 16 kiihtyvyyssanturia siten, että kummassakin kiskossa on kiihtyvyyssanturit 8 peräkkäisen pölkyn kohdalla. Tällainen pienen alueen järjestelmällinen pistemäinen mittaaminen auttaa todella paljon edellä esitetyn jatkuvaan mittaukseen kykenevän mittalaitteen antamien tulosten absoluuttitason määrittämisessä.

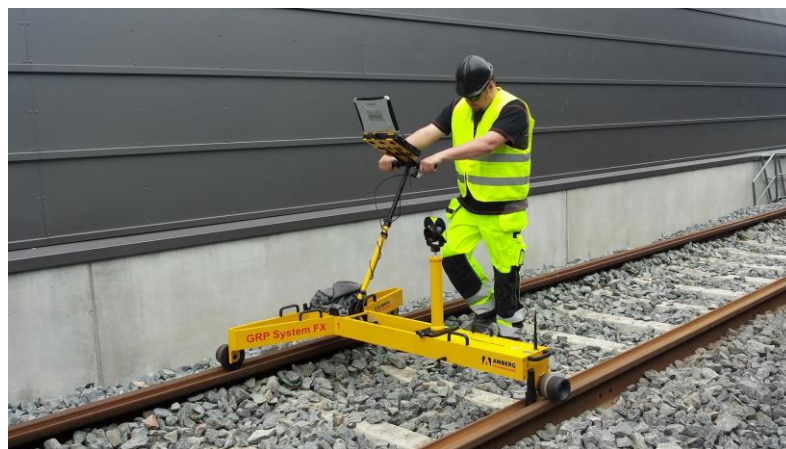


## 3.2 Radan pysyvän painuman mittaaminen

Kuten edelläkin jo todettiin, pohjainten vaikutusta vaihteiden käyttäytymiseen tulee tarkastella palautuvan painuman muutosten ohella myös pysyvän painuman kautta. Tämä tarkoittaa käytännössä radan absoluuttisen geometrian seuraamista ilman juna-kuormia. Absoluuttigeometria muuttuu normaalisti hyvin hitaasti, joten mittausten on perustuttava pidemmän aikavälin seuraamiseen ja analysointiin.

Luvussa 3.1.1 esitelty mittalaite ei pysty määrittelemään pysyvää painumaa, koska sen mittaustekniikka ei perustu absoluuttisen geometrian mittaamiseen. Se mittaa ainoastaan kuormitetun ja kuormittamattoman radan suhteellista geometriaeroa. Koevaihteiden pysyvä painuma haluttiin kuitenkin saada mitattua jatkuvalla menetelmällä, koska etukäteen ei ollut täysin varmaa tietoa siitä, missä kohdassa pysyvää painumaa voisi syntyä eniten. Pysyvän painuman jatkuva mittaaminen oli siis toteutettava erillisellä mittausvaunulla, joka on suunniteltu nimenomaan tätä tarkoitusta varten.

Pysyvän painuman jatkuva mittaaminen toteutettiin kaikissa koevaihteissa Proacon Oy:n Rami-wagonilla, joka on esitetty kuvassa 6. Se on takymetrin avulla toimiva mitausvaunu, joka tuottaa kartoitus- ja nuotitusdataa moninkertaisella nopeudella verrattuna perinteiseen pistemäiseen menetelmään (Proacon 2012). Laitteella on siis mahdollista mitata pystysuuntaisen painuman lisäksi myös muita radan tarkastusmittoja, kuten raiteen vaakasuuntainen asema, raideleveys ja kallistus.



Kuva 6. Proacon Oy:n operoima Rami-wagon mittausvaunu. (Proacon 2012)

Tällä mittausvaunulla tehtiin yhteensä kaksi ajoa, joista ensimmäinen suoritettiin 3.12.2015, toinen 13.10.2016. Näillä kahdella mittaustuloksella pystyttiin saamaan hyvä peruskäsitys radan pysyvän painuman kehittymisestä eri koevaihteissa.

Kuten edellisessä luvussa mainittiin, pysyvää painumaa mitattiin vaunun ohella myös rataa asennettujen pistemäisten siirtymäanturien avulla. Näitä antureita asennettiin kuitenkin melko harvakseltaan, kuten Liitteen 1 kuvat osoittavat, joten niiden perusteella ei saada kovinkaan laajamittaista tietoa kokonaisen vaihderakenteen painumasta. Ne toimivat kuitenkin hyvänä lisäinfona ja tarkastuskeinona vaunumittauksista saaduille tuloksille, sillä niiden mittaustarkkuus on moninkertainen vaunumittauksiin verrattuna. Vaunumittauksen virherajat ovat takymetriin perustuvassa mittauksessa noin 2-3 mm luokkaa, kun siirtymäantureilla ja referenssitangolla mitattaessa virherajat ovat noin 0,2 mm tasolla.

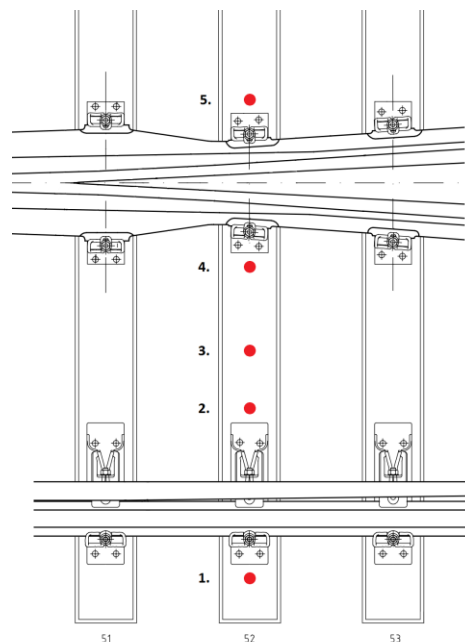


### 3.3 Risteysalueen pölkyn rasitustilan mittaaminen

Pystysuuntaisen painuman lisäksi koekohteista mitattiin myös risteyskärjen alla olevien pitkien pölkkyjen rasitustilaa. Monissa vaihteissa ympäri Suomea pitkän risteyspölkyn on havaittu olevan ongelmakohta ja pölkky on jostain syystä painunut risteyskärjen alta. Tämä indikoi siitä, että pölkkyyn kohdistuu risteysalueella todella merkittäviä ja ennen kaikkea epätasaisia kuormituksia, jotka saavat pölkkyt taipumaan.

Pölkyn taipumaa tarkasteltiin mittaamalla pölkyn yläpinnan muodonmuutoksia venymäliuskojen avulla. Venymäliuskojen tiedetään kestävän todella huonosti rataolosuhteissa, joten niitä ei ole tarkoituksen mukaista kiinnittää pölkkyyn pysyvästi. Mittaus voidaan toteuttaa tehokkaammin liimaamalla venymäliuskat erilliseen metallirakenteeseen, joka voidaan helposti kiinnittää pölkyn yläpintaan pulteilla ja mitata siten pölkyn pinnan muodonmuutoksia. Mittaus on myös helposti toistettavissa, kun pölkkyssä on valmiit reiät, jolloin metallilevy tulee aina tarkasti samaan kohtaan.

Mittaus toteutettiin jokaisen koevaihteen risteysalueella pölkkyssä numero 52 yhteensä 5 pisteestä. Pisteet sijaitsivat kuvan 7 mukaisesti 80 mm päässä vaihtealuslevyn kummastakin reunasta, raiteen keskilinjalla sekä 80 mm etäisyydellä risteyskärjen reunoista.



*Kuva 7. Anturien sijainnit koevaihteiden risteysalueella tehdyille pölkyn taipumamittauksille. Pisteet 1, 2, 4 ja 5 sijaitsevat 80 mm päässä kiinnityksistä ja piste 4 on suoran raiteen keskilinjalla.*

Vaihteissa käytettävän vastakiskopukin rakenteen takia pölkyn taipumaa ei pystytä mittaamaan aivan ulkokiskon vierestä, mutta näiden mittapisteiden avulla saadaan kuitenkin määritettyä paras mahdollinen arvio pölkyn kokemasta rasituksesta junan ylityksen aikana.

### 3.4 Kiskojen ja risteysalueen kulumisen ja muodonmuutosten mittaaminen

Siirtymien ja painumien ohella pohjainvaihteista mitattiin tässä projektissa myös kiskojen, kielten ja risteyskärjen kulumista. Jäykän rakenteen vuoksi kulumisen on monesti muodostunut ongelmaksi varsinkin risteyskärjissä ja vaihteen käyrässä kielessä, jolloin niitä joudutaan hiomaan ja vaihtamaan ennenaikaisesti. Pohjainten kuormituk-  
sia tasaavan ominaisuuden voidaan olettaa tasoittavan myös näitä kiskoihin kohdistuvia kuormituksia, jolloin kulumisen saattaa vähentyä.

Kiskojen, kielten ja risteysalueen kulumista mitattiin kahdella eri laitteella. Ensimmäinen mittaus vuonna 2015 tehtiin Greenwood Engineeringin kehittämän Miniprof-laitteen avulla. Miniprof-laitteen avulla pystytään mittaamaan useiden eri komponenttien profiileja laitteessa olevan piirtomittapään avulla (Kuva 8). Mittauksen aikana laite tallentaa jatkuvasti mittapään kärjen tarkkaa asemaa, jolloin profiili muodostuu tallennetusta pistepilvijoukosta. Mittapäällä pystytään siihen liitetystä lisäosista riippuen mittaamaan kiskojen, pyörien tai esimerkiksi junan jarrulevyjen profiilin muotoa. Tämän projektin yhteydessä oli käytössä sekä normaalien kiskojen profiilin mittaamiseen käytettävä Miniprof Rail sekä vaihteiden risteyskärjen ja siipikiskojen profiilin mittaamiseen käytettävä Miniprof Switch.



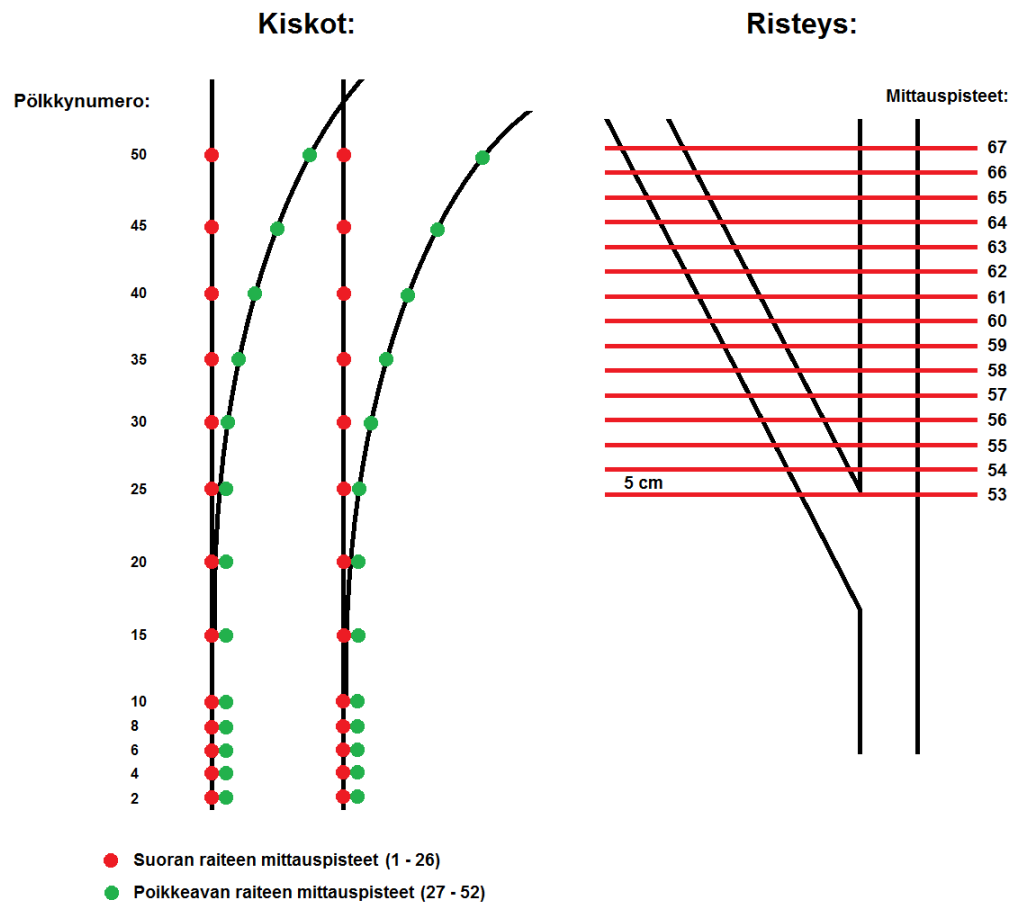
Kuva 8. Miniprof Rail -mittalaite.

Vuonna 2017 käytössä oli Miniprofin rinnalla myös Nextsensen kehittämä Calipri-mittalaite. Se eroaa merkittävästi Miniprof-laitteesta, sillä sen mittaus perustuu mekaanisen kosketuksen sijaan laitteen lähettämien lasersäteiden kuvaamiseen kappaleen pinnalla, kuten kuva 9 osoittaa. Laitteen sijainnin ja viivojen keskinäisen etäisyyksien perusteella laite pystyy muodostamaan mitattavasta profiilista pistepilven. Mittaus on siis täysin kosketukseton, joten laitetta voidaan liikutella vapaasti mitattavan profiilin päällä, joka mahdollistaa isompientkin kokonaisuuksien, kuten risteyskärjen, mittaamisen yhdellä kertaa. Miniprofin piirtokynällä on selkeät fyysiset ulottumat, jolloin esimerkiksi risteyskärjen profiili joudutaan kokoamaan usean erillisen mittauksen tulok-  
sista. Calipri tarjoaa siis merkittävästi tehokkaampaa mittausta varsinkin vaihdealueella, jossa on mitattavana useita leveitä erikoisprofiileja.



Kuva 9. Calipri-lasermittalaite

Näiden laitteiden avulla saatiin kaikista koevaihteista mitattua kiskoprofiilit kuvan 10 mukaisista poikkileikkauksista suoralta ja poikkeavalta raiteelta sekä risteyskärjestä. Profiileja mitattiin näin ollen yhteensä 67 kappaletta per vaihde.



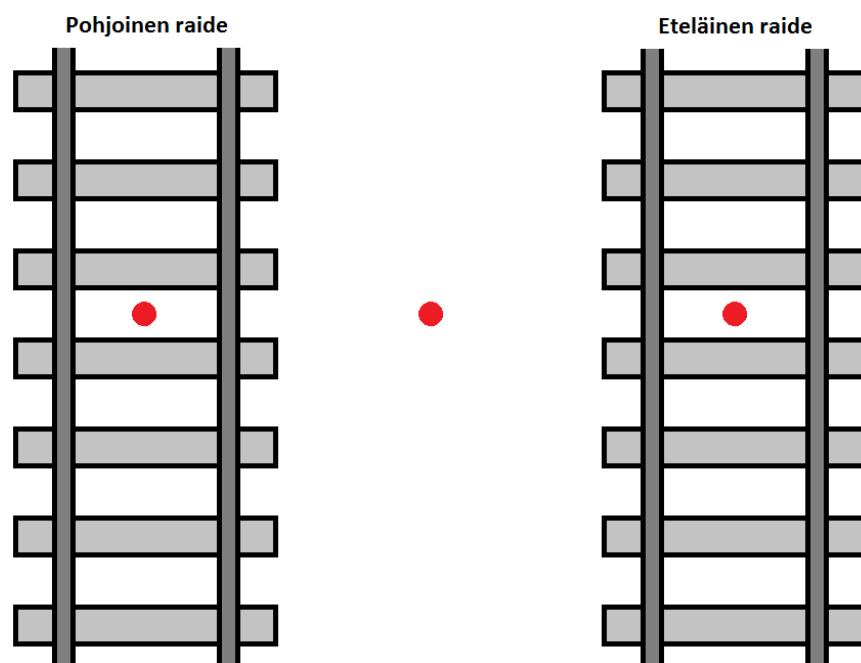
Kuva 10. Kiskon kulumisen mittauspisteet.

Kiskojen ja risteysten profiileja mitattiin projektin aikana 2 kertaa, joista ensimmäinen suoritettiin ennen liikenteen avaamista kesäkuussa 2015. Kiskojen oletettiin kuluvan tällaisessa homogeenisen liikenteen omaavassa uudessa ratarakenteessa melko hitaasti, joten toinen mittaus tehtiin vasta aivan projektin loppupuolella toukokuussa 2017. Näitä tuloksia vertailemalla saadaan arvio kiskojen kulumisvauhdista eri vaihteissa.

### 3.5 Tukikerroksen värähtelyn mittaaminen

Muiden ominaisuuksien ohella pohjaimien odotetaan vaikuttavan myös vaihteiden alusrakenteessa syntyvään tärinään, joka voi johtaa läheisissä rakenteissa runkomeluun. Koevaihteet on asennettu vierekkäin täysin uudelle ratapenkalle, joten alusrakenteen voidaan ajatella olevan käytännössä muuttumaton koko mittausalueella. Näin ollen tärinän voimakkuus alusrakenteessa voidaan määrittää vaihteisiin asennettavien kiihtyvyyssanturin avulla, joita sijoitettiin kummankin raiteen keskilinjalle sekä raiteiden väliin kuvan 11 osoittamalla tavalla.

Kyseisistä kohdista poistettiin sepeli noin pölkyn alapinnan tasolle asti (kv -30 cm) ja tuohon syvyyteen asennettiin sekä pystysuuntaista että vaakasuuntaista kiihtyvyyttä mittaavat anturit. Anturit pystyivät mittaamaan vaakasuuntaista kiihtyvyyttä vain yhden akselin suuntaisesti, joten anturit kohdistettiin sepelikerrokseen niin, että ne mittaavat kiihtyvyyttä nimenomaan radan poikittaissuunnassa. Tämän suuntainen kiihtyvyys yhdessä pystykiihtyvyyden kanssa on ymmärrettävästi runkomelun etenemisen kannalta kaikista kriittisintä, koska raiteen suunnassa värähtely ei tavoita muita rakenteita.



Kuva 11. Radan alusrakenteen värähtelytasoja mittaavien kiihtyvyyssanturien sijoittelu.

Kuvassa 11 näkyvät mittauspisteet valittiin siten, että mittaus olisi helppo suorittaa samanlaisena kummaltakin raiteelta ilman antureiden siirtoa. Eli kumpaankin suuntaan ajettaessa ensimmäinen mittauspiste on junan alla, toinen mittauspiste noin 2 metrin päässä radasta ja toinen 4,5 metrin (raideväli) päässä radasta. Näin tulokset ovat helpoiten vertailtavissa keskenään.

Koekohteisiin valittu kohtalaisen jäykkä pohjain (jäykkyys yli  $0,25 \text{ N/mm}^3$ ) ei ole muista maista saatujen kokemusten perusteella (Auer et al. 2013) parhaimmillaan värähtelyjen ja melun poistamisessa. Tämä ei ollutkaan pohjainten päätarkoitus, sillä kyseinen avorataosuudella sijaitseva koekohde ei erityisesti altista ympäristöä runkome-lun kohteeksi. Nämä mittaukset toimivat lähinnä siis vain lisätietona pohjaimen kokonaisvaikutuksista.

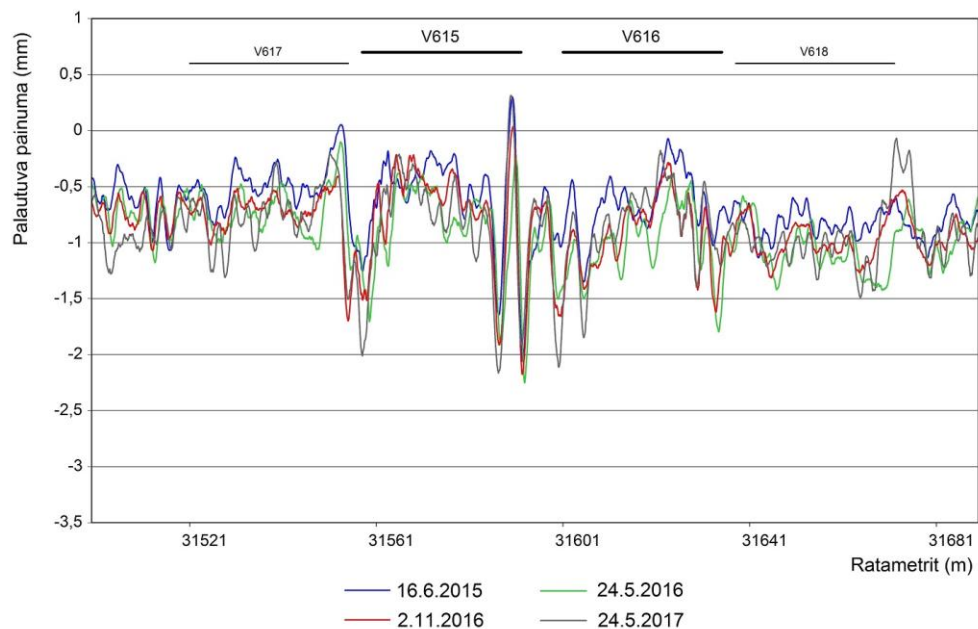


## 4 Mittaustulokset ja analysointi

Projektin aikana Asolassa sijaitsevien koevaihteiden käyttäytymistä seurattiin noin 2 vuoden ajan. Tämä on vaihteiden suunnitellun käyttöiän kannalta hyvin lyhyt ajanjakso, mutta tälläkin ajanjaksolla on mahdollista tehdä jo tiettyjä havaintoja vaihteiden käyttäytymisestä ja pohjainten soveltuvuudesta suomalaiseen ratarakenteeseen. Seuraavissa luvuissa on esitelty ja analysoitu näistä koevaihteista saatuja tuloksia.

### 4.1 Radan palautuva painuma

Vaihteista mitattiin radan palautuvaa painumaa sekä jatkuvalla että pistemäisellä menetelmällä. Jatkuvan menetelmän mittauksia suoritettiin yhteensä 4 kertaa, jotka ajoituivat luvun 3.1.1 mukaisesti ajanjaksolle 06/2015 – 05/2017. Ensimmäisellä mittauksella pyrittiin selvittämään vaihteiden palautuvan painuman lähtötilanne, jota voidaan verrata kolmeen muuhun mittaukseen. Kuvassa 12 on esitetty päällekkäin kaikkien neljän mittauksen tulokset vaihteiden V615 ja V616 suorilla reiteillä, eli pohjoisella raiteella, jossa ei ole pohjaimia. Kuvassa näkyvät vaihde-merkinnät on korostettu sen mukaan, mitä reittiä kyseisellä mittauskerralla on ajettu. Mittalaitteen antamat palautuvan painuman tasot varmennettiin jokaisella mittauskerralla pistemäisten anturien tulosten perusteella, mutta näitä pistemäisiä ”varmennusarvoja” ei ole esitetty kuvissa, jotta ne pysyvät paremmin luettavina.



Kuva 12. Elastisuusmittalaitteella mitatut radan palautuvan painuman arvot vaihteiden V615 ja V616 suorilta reiteiltä välillä kesäkuu 2015 – toukokuu 2017. Mustat viivat kuvaavat vaihdealueita ja korostettu musta ajettua reittiä.

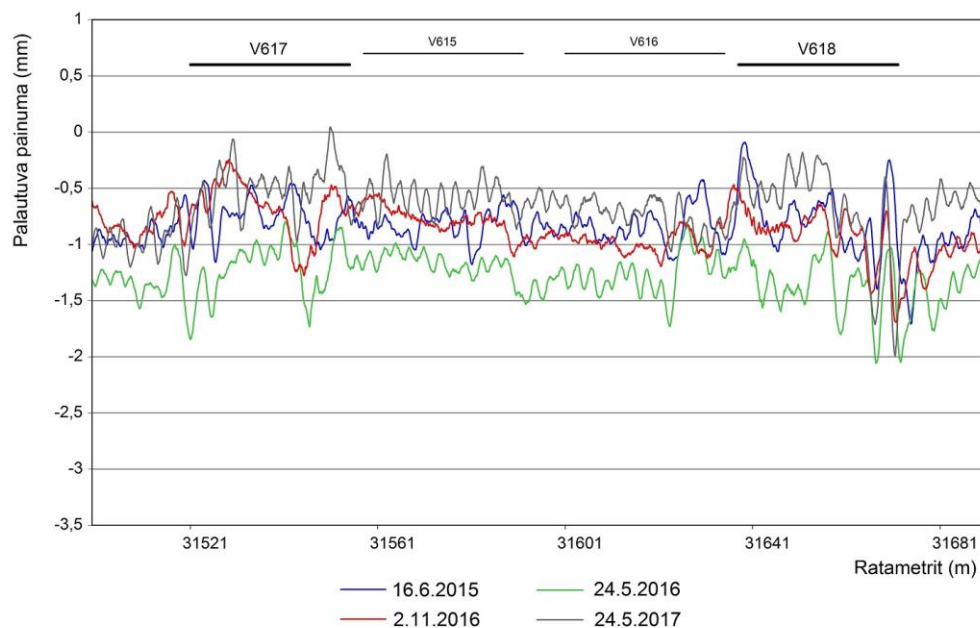
Kuva 12 osoittaa, että pohjoisella raiteella palautuva painuma on pysynyt seurantajakson aikana kohtuullisen muuttumattomana mittauskertojen välillä. Palautuva painuma on kehittynyt ensimmäisen ja viimeisen mittauksen välillä vain alle 0,5 mm verran, joten rakenteen voidaan sanoa suurimmalta osin olevan kunnossa. Raiteen geometriasta

pystytään kuitenkin jo ensimmäisellä mittauskerralla havaitsemaan tiettyjä ongelmakohtia, joista selkeimmäksi nousee vaihteen V615 kärki- ja takajatkosalue (ratametrit 31 555 ja 31 590), joissa palautuva painuma vaihtuu lyhyellä matkalla jopa 1,5–2 mm. Ongelmat näillä alueilla on tunnettuja jo aikaisemmistakin vastaavista mittauksista, joita on tehty Kaipiaisissa, Taavetissa ja Tampereella vuosina 2012–2013 (Varis 2017). Syy näihin painumiin on todennäköisesti se, että vaihteenkääntölaitteiden kohdalla olevia pitkiä vaihdepölkkyjä ei tueta koneellisesti muun vaihteen tapaan, koska koneen hakut rikkoisivat sepelitukikerroksessa kulkevat vaihteenkääntölaitteen kääntötangot. Kyseiset kohdat tuetaan kyllä jälkikäteen käsikäyttöisillä tukemiskoneilla, mutta tällä tavalla tuennan lopputulos ei juuri koskaan johda koneellista tuentaa vastaavaan tilanteeseen. Nämä pölkkyt ovat siis jo lähtökohtaisesti huonommin tuettu, jolloin ne painuvat enemmän. Takajatkosalueella ongelmaksi muodostuu kohta, jossa pitkät vaihdepölkkyt muuttuvat kahdeksi lyhyemmäksi pölkkyksi, joka vaikuttaa merkittävästi radan jäykkyyteen. Nämä kummatkin seikat johtavat siihen, että näillä lyhyillä muutosalueilla syntyy junan yliajon aikana merkittäviä iskukuormituksia ja suurempia palautuvia painumia saattaa hyvinkin nopeasti päästä syntymään, kuten vaihteen V615 alueelta voidaan havaita. Palautuvan painuman kasvua lisää myös se seikka, että kiskon taivutusjäykkyys estää näiden yksittäisten pölkkyjen pysyvän painuman heikkenevän sepelin mukana, jolloin pölkkyt alkavat ajan saatossa roikkua ilmassa. Tukemiseen liittyvistä asioista on kerrottu lisää Peltokangas & Nurmikolun (2015) tekemässä julkaisussa ”Raidegeometrian kunnossapito tukemalla ja tukemiskalusto Suomen rataverkolla”.

Absoluuttiarvoja tarkasteltaessa nämä kyseisten ongelma-alueiden palautuvat painumat eivät ole vielä merkitsevän suuria, kun niitä verrataan RATO:n osassa 3 (Liikennevirasto 2014b) määriteltuihin palautuvan painuman raja-arvoihin, joiden mukaan rata saa painua täyden mitoitusakselikuorman alla enintään 4 mm. Tällaiset jäykkyysvaihtelut synnyttävät kuitenkin rataa ylimääräisiä dynaamisia iskukuormituksia, joiden vaikutukset näkyvät myös kuvan 12 mittaustuloksissa. Kehäradalla käytetään vasemmanpuolista liikennettä, jolloin junat ajavat pohjoisella raiteella lännestä itään. Liikennesuunnan vaikutus näkyy, sillä palautuva painuma on selkeästi kasvanut kyseisten ongelmakohtien itäpuolella, varsinkin vaihteen V616 kärkialueella. Jäykkyyden äkillinen muuttuminen aiheuttaa junaan värähtelyä, jolloin kuormitus on hyvin dynaamista myös vaihteen V615 muutosalueen jälkeen. Kesällä 2015 vaihteen V616 kärkialueelle ei ole muodostunut vielä kovinkaan merkittäviä painumia ja taso on yleisesti noin 0,5–1 mm tasolla. Jäykkyysmuutoksien ja liikennesuunnan aikaansaama dynaamisuus on kuitenkin kahden vuoden seurantajakson aikana muodostanut vaihteen V616 kärkialueellekin uusia palautuvan painuman piikkejä, joiden arvot on kasvanut viimeiseen mittaukseen mennessä jo yli 2 millimetriin. Näiden tulosten pohjalta voidaan myös olettaa, että palautuvan painuman piikit kasvavat tällä alueella tulevaisuudessa, jos asialle ei tehdä mitään.

Pohjoisen raiteen tapaan mittaukset suoritettiin myös eteläisen raiteen pohjaimellisten vaihteiden V617 ja V618 suorilla reiteillä, joiden tulokset on esitetty kuvassa 13. Eteläisen raiteen vaihteissa V617 ja V618 näkyy selkeämmin eroja eri mittauskertojen välillä. Palautuva painuma on kasvanut ensimmäisen (kesä 2015) ja toisen mittauksen (keväät 2016) välisenä aikana koko alueella noin 0,5 mm. Tämä on tietenkin hyvin maltillinen muutos, varsinkin kun otetaan huomioon, että painuman absoluuttitaso on tämänkin jälkeen yleisesti vain noin 1,5 mm tasolla. Seuraava loppusyksyn 2016 mittaus osoittaa, että palautuva painuma on pienentynyt lähelle lähtötasoa, joka viittaa rakenteen tiivistymiseen tai alhaisemman lämpötilan jäykistävään vaikutukseen. Näitä asioita ei ole nähtävillä pohjoisen raiteen käyttäytymisessä, joka todennäköisesti johtuu juuri pohjaimesta. Kuvan 13 mukaan pohjaimellisen pölkyn jäykkyys on normaalia

pölkkyä alhaisempi alkuvaiheessa, kun pohjain painuu sepelitukikerrokseen. Tämän asettumisen jälkeen jäykkyys kuitenkin tasoittuu ja radan palautuvat painumat pienevät merkittävästi. Myös lämpötilalla on vaikutusta pohjaimen ominaisuuksiin, jolloin kokonaisrakenne jäykistyy sitäkin kautta. Pohjaimien valmistaja Getznerin mukaan näissä koekohteissa käytettävän Sylomer-materiaalin jäykkyys kasvaa noin 25 % siirtäessä neutraalilämpötilasta (+20°C) - 10°C lämpötilaan (Getzner 2013). Näiden palautuvan painuman mittausten välillä on lämpötilaeroa noin 15-20°C juuri tällä alueella, joten vaikutuksen voidaan varmuudella sanoa olevan yli 10 prosenttia.

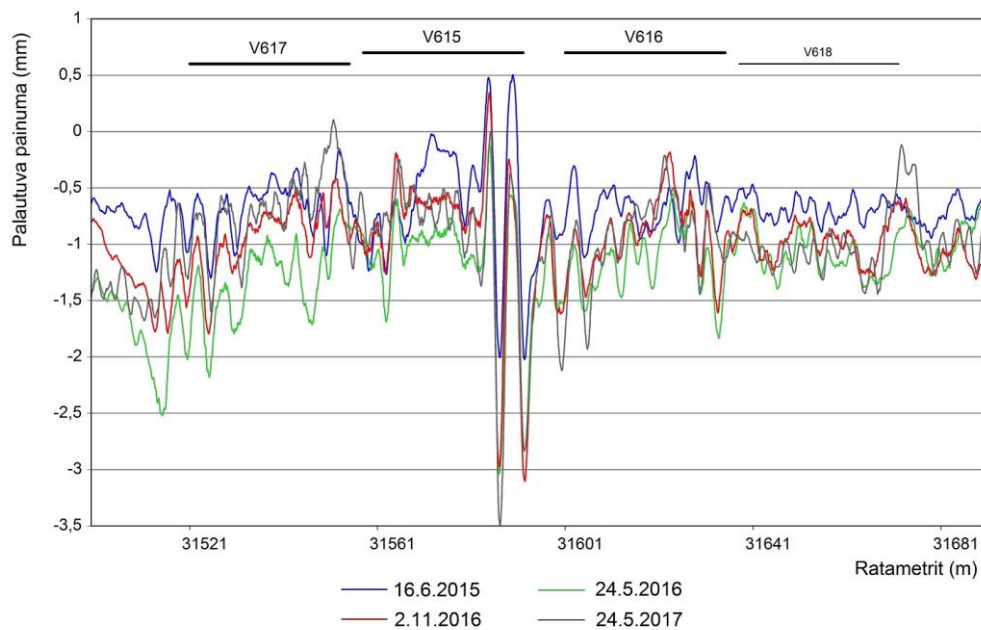


Kuva 13. Elastisuusmittalaitteella mitatut radan palautuvan painuman arvot vaihteiden V617 ja V618 suorilta reiteiltä välillä kesäkuu 2015 – toukokuu 2017. Mustat viivat kuvaavat vaihdealueita ja korostettu musta ajettua reittiä.

Viimeinen mittaus kesältä 2017 osoittaa palautuvan painuman pienentyneen edelleen, joka saattaa johtua osittain myös siitä, että Asolan alue on tuettu marraskuun puolivälissä 2016. Raiteen palautuva painuma on siis toisin sanoen kehittynyt seurantajakson aikana parempaan suuntaan, joka varmasti ainakin suurelta osin on pohjaimen ansiota. Tämä johtopäätös perustuu siihen, että pohjoisella raiteella (kuva 12) tukemisen vaikutukset eivät näy käytännössä lainkaan.

Tarkasteltaessa eteläisen raiteen palautuvaa painumaa yksityiskohtaisemmin, sieltä voidaan nostaa esille vaihteen V618 kärkialue (ratametrit 31 670), jossa on jo ensimmäisissä mittauksissa havaittu voimakkaampia painuman muutoksia. Myös tällä alueella painumapiikit ovat hieman ajan saatossa kasvaneet ja edes marraskuun 2016 tukeminen ei poistanut kyseisen kärkialueen painumaongelmia. Tämä viittaa joko epäonnistuneeseen tuentaan tai siihen, että palautuvan painuman muutokset johtuvat suurimmaksi osaksi alusrakennekerroksen muutoksista, jolloin tukemisella ei päästä vaikuttamaan asiaan. Palautuvan painuman absoluuttitasot eivät ole kasvaneet merkittävästi, mutta pienikin kasvu indikoi kuitenkin sitä, että jatkossa tämäkin kohta saattaa muodostua ongelmaksi myös absoluuttipainuman osalta.

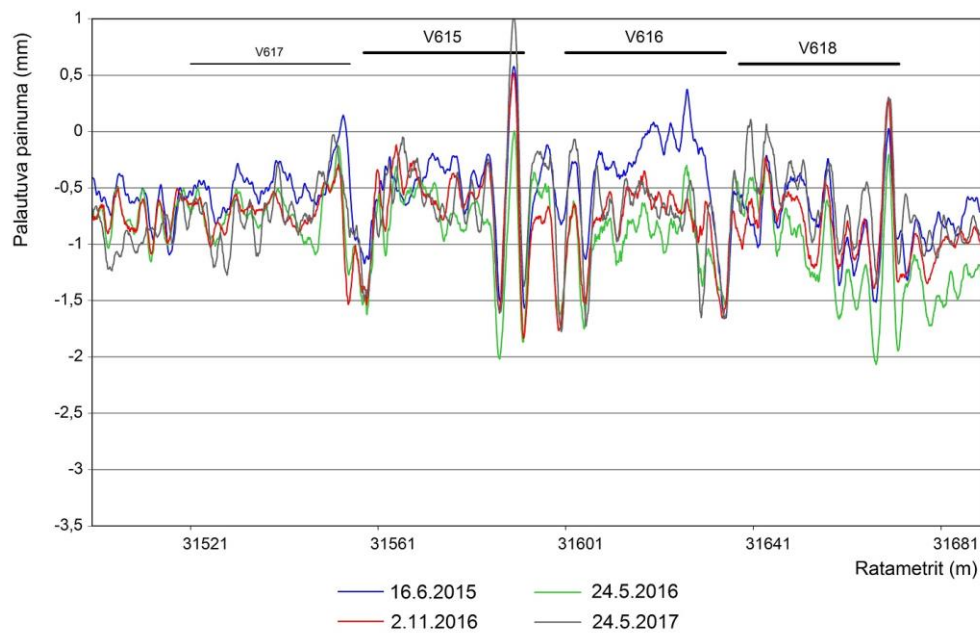
Vaihteiden suorien reittien lisäksi voidaan tarkastella myös vaihteiden poikkeavia reittejä, joiden palautuvan painuman tulokset on esitelty kuvissa 14 ja 15.



Kuva 14. Elastisuusmittalaitteella mitatut radan palautuvan painuman arvot vaihteen V616 suoralta reitiltä ja vaihteiden V615 ja V617 poikkeavilta reiteiltä välillä kesäkuu 2015 – toukokuu 2017. Mustat viivat kuvaavat vaihtalueita ja korostettu musta ajettua reittiä.

Kuvasta 14 nähdään, että mittauksen ajoreitti on vaihteen V616 ja sen itäpuolen osalta täysin sama kuin kuvassa 12, jolloin palautuva painuma on siltä osin käytännössä muuttumatonta ja edellä kuvatut ongelmat vaihteiden V616 kärkialueella ovat havaittavissa. Poikkeavan reitin ajaminen vaikuttaa kuitenkin heti vaihteen V615 kärjestä lähtien siihen, että palautuvan painuman piikit näyttävät entistä suurempina ja ne ovat mittausaikana kasvaneet jopa 3,5 millimetriin. Syy tähän palautuvan painuman kasvamiseen löytyy todennäköisesti siitä, että tässä kohdassa poikkeavan raiteen kaarresäde muuttuu äkillisesti arvosta 0 arvoon 300, jolloin TKA:n raskaat pyörät ja mittalaitteen kevyet pyörät eivät kulje pienistä kartiokkuuseroista johtuen täysin samaa reittiä. Kyseessä on siis osittainen mittausvirhe.

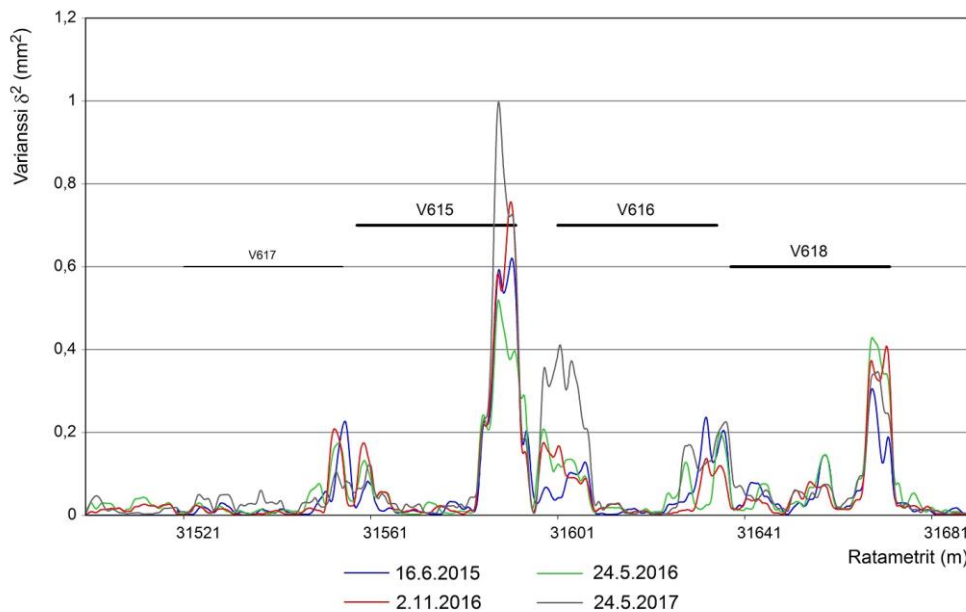
Kaarteeseen ajaminen aiheuttaa muutenkin selkeämpiä eroja eri mittauskertojen välille. Nämä erot tosin johtuvat suurimmaksi osaksi edellisessä kappaleessa mainitusta tiukasta kaarresäteestä. Kuvasta 14 voidaan nähdä, että esimerkiksi kevään ja syksyn 2016 mittaukset ovat hyvin lähellä toisiaan vaihteessa V616 ja sen itäpuolella. Mutta siirryttäessä vaihteiden V615 ja V617 alueelle, kyseisten mittaustulosten välille syntyy noin 0,3 mm absoluuttiero, joka johtuu todennäköisesti pyörien kartiokkuuseroista. Todellista palautuvan painuman absoluuttitasoa on tällöin hyvin vaikea määritellä tiukassa kaarteessa, joten tällä alueella voidaan analysoida ainoastaan yksittäisen painumapiikkien amplitudeja ja muutosnopeutta. Poikkeavalla reitillä ei ole kuitenkaan havaittavissa yhtäkään yksittäistä kohtaa, jossa palautuva painuma olisi ajan mittaan muuttunut merkittävästi heikompaan suuntaan.



Kuva 15. Elastisuusmittalaitteella mitatut radan palautuvan painuman arvot vaihteen V615 suoralta reitiltä ja vaihteiden V616 ja V618 poikkeavilta reitiltä välillä kesäkuu 2015 – toukokuu 2017. Mustat viivat kuvaavat vaihteen V615 suoraa reittiä ja korostettu musta ajettua reittiä.

Kuvassa 15 palautuva painuma on jälleen lännestä alkaen vaihteen V616 kärkeen asti vastaava kuin kuvassa 12. Vaihteen V616 kärjen jälkeen merkittävin huomio poikkeavalla reitillä on vaihteiden takajatkoksien alueella (ratametrit 31 635) oleva selkeä painumapiikki, joka toistuu jokaisessa 4 mittauksessa. Tämä on kuitenkin juuri se kohta, jossa kaarresäde muuttuu lyhyellä matkalla arvosta 300 arvoon -300, jolloin kyseessä on todennäköisesti samanlainen virheilmiö, kuin ajettaessa vaihteen V615 kärkialueelle kuvan 14 mukaisessa tilanteessa. Vaihteen V618 kärkialueen painuma on poikkeavasta reitistä huolimatta hyvin saman suuruinen kuin kuvassa 13.

Nämä analyysit osoittavat, että palautuvan painuman absoluuttiarvoja merkityksellisempää on tässä kohtaa tarkastella nimenomaan painuman muutosnopeutta. Siihen päästään jollakin tasolla kiinni siis jo suoraan kuvien 12-15 perusteella, mutta sitä voidaan vielä paremmin kuvata määrittämällä painumasta liukuva varianssi  $\delta^2$ . Varianssi kuvaa tässä satunnaismuuttujien tapauksessa käytännössä neliöllisesti palautuvan painuman keskimääräistä poikkeamaa keskiarvosta (keskihajonta  $\delta$ ), joka kertoo 5 metrin liukuvana arvona laskettuna tehokkaasti painuman muutosnopeudesta. Kuvassa 16 on esitetty vaihteiden V616 ja V618 poikkeavan reitin ajoista laskettu 5 metrin liukuva varianssi. Tämä siis vastaa kuvan 15 tilannetta, jossa on ylitetty sekä eteläisen että pohjoisen raiteen selkeimmät painumakohdat, eli vaihteiden V615, v616 ja V618 kärkialueet.



Kuva 16. Elastisuusvaunulla mitatun radan palautuvan painuman 5 metrin liukuva varianssi vaihteen V615 suoralta reitiltä ja vaihteiden V616 ja V618 poikkeavilta reiteiltä välillä kesäkuu 2015 – toukokuu 2017. Mustat viivat kuvaavat vaihdealueita ja korostettu musta ajettua reittiä.

Varianssin avulla palautuvan painuman muutosta on helpompaa analysoida ja vertailla, sillä varianssin perusarvo on hyvällä ja tasaisella radalla teoriassa aina nolla. Eri rataosilta tai eri vaihteista saatuja variansseja voidaan verrata suoraan keskenään ja varianssille pystytään luomaan tämän avulla yksikäsittisempiä raja-arvoja.

Aiemmista linjaradalla tehdyistä vastaavista mittauksista (Luomala et al. 2017) on pystytty määrittämään, että palautuvan painuman varianssin maksimi-arvot vaihtelevat normaalilla radalla noin 0,2–0,6 välillä. Näihin arvoihin perustuen voidaan todeta, että vaihteiden V615 ja V616 kärkialueilla (31 585–31 600) palautuvan painuman varianssi on kohtuullisen suurta, varsinkin viimeisellä mittauskerralla toukokuussa 2017, jolloin varianssi on hetkellisesti 1,0. Vaihteen V618 kärjen alueella varianssi on maltillisempaa ja pysyy jokaisella mittauskerralla alle 0,5:n. Varianssin määrittäminen siis tukee aiempia havaintoja siitä, että vaihteen V615 kärjen alueelle on muodostunut ihan merkittävä palautuvan painuman ongelma, joka olisi syytä korjata.

Palautuvaa painumaa mitattiin yllä kuvatun jatkuvan menetelmän lisäksi siis myös kuvan 4 mukaisilla pistemäisillä siirtymäantureilla, joiden asennuspaikat on kuvattu liitteessä 1. Näillä antureilla pystyttiin siis mittaamaan radan käyttäytymistä myös rataa käyttävän todellisen kaluston, eli Sm5-junien yliajojen aikana. Taulukossa 2 on esitetty siirtymäantureilla mitatut pölkyn päiden palautuvat painumat kaikilta neljältä eri mittauskerralta, joita suoritettiin puolen vuoden välein aikavälillä marraskuu 2015 – toukokuu 2017. Anturit on asennettu aina pölkyn kumpaakin päähän, jolloin yksittäisen pölkyn painumaa mitataan aina kahdella anturilla, jotka on eroteltu omiksi kokonaisuuksiksi. Pölkkynumeron yhteydessä on myös kerrottu, mitkä pölkkyistä on varustettu pohjaimilla. Taulukosta on poistettu kaikki arvot, jotka eivät olleet mittaushetkellä luotettavia. Varsinkin ensimmäisellä mittauskerralla 24.11.2015 olosuhteet olivat hyvin haastavat (vesisade, 0°C), jolloin antureiden karat jäätivät paikoilleen toistuvasti kesken mittauksen ja luotettavien arvojen saaminen oli näin ollen mahdotonta.



Taulukko 2. Pölkkyjen palautuvat painumat kaikista 16 mittauspisteestä aikavälillä 24.11.2015–23.5.2017. ER = eteläinen raide pohjaimella ja PR = Pohjoisen raide ilman pohjainta.

Pölkky	Anturi (mm)	24.11.2015	24.5.2016	2.11.2016	23.5.2017
1 (ER)	S1	-	-0,77	-0,51	-1,36
	S2	-1,87	-3,14	-2,67	-2,71
2 (PR)	S3	-0,66	-0,66	-0,67	-0,37
	S4	-	-0,66	-0,93	-0,56
3 (PR)	S5	-1,15	-1,13	-1,24	-1,26
	S6	-1,83	-2,05	-2,28	-2,82
4 (ER)	S7	-	-1,31	-0,96	-0,93
	S8	-0,87	-1,31	-1,05	-0,9
5 (PR)	S9	-0,75	-0,51	-0,97	-0,36
	S10	-0,05	-0,12	-0,11	-0,12
6 (PR)	S11	-0,28	-0,12	-0,39	-0,19
	S12	-0,9	-1,4	-0,74	-0,6
7 (ER)	S13	-	-	-0,31	-0,35
	S14	-	-0,9	-0,81	-0,8
8 (ER)	S15	-	-0,62	-0,59	-0,44
	S16	-	-0,3	-0,15	-0,15

Taulukon 2 avulla on selkeästi havaittavissa, että suurimmat painumat tapahtuvat pölkkyissä 1 sekä 3, jotka ovat pitkiä kääntölaitepölkkyjä. Ilman koneellista tukemista ne painuvat jo asennuksenkin jälkeen enemmän kuin muut pölkkyt, joka kasvattaa kuormituksen dynaamisuutta huonontaan tilannetta entisestään. Tämä on siis aivan sama huomio, joka tehtiin jo jatkuvan mittaamisen yhteydessä. Pistemäisten anturien avulla päästään kuitenkin näkemään tarkemmin näiden yksittäisten pölkkyjen käyttäytymistä kummastakin päästä. Kuten taulukosta 2 voidaan nähdä, näiden kääntölaitepölkkyjen painuma on hyvin epätasaista. Pölkyn lyhyempi pää painuu noin kaksi kertaa enemmän kuin pölkyn kääntölaitteen puoleinen pää, vaikka anturit sinänsä ovat kummallakin puolella yhtä kaukana kiskoista. Tämä painumaero johtuu siitä, että pölkky pääsee tukeutumaan sepeliin koko pitkältä puoleltaan tehokkaammin, jolloin painumaa ei pääse muodostumaan tälle puolelle. Tulokset osoittavat, että pölkkyä ei välttämättä kannattaisi tukea vaihteenkääntölaitteen alta, vaan ainoastaan pölkyn tehokkaalta osalta, eli noin 1,3 metriä raiteen keskilinjan kummaltakin puolelta.

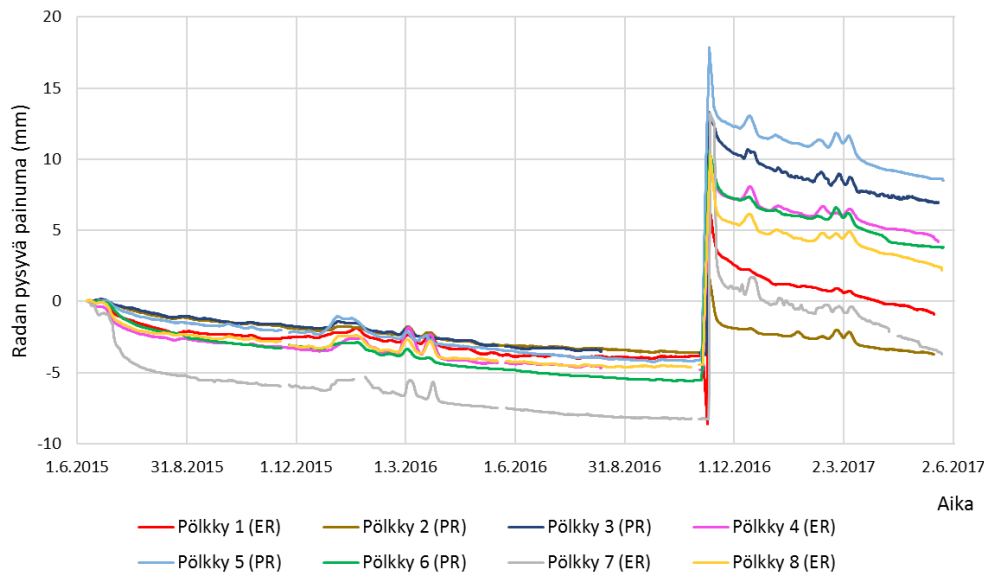
Muiden pölkkyjen osalta painuma on huomattavasti tasaisempaa, koska ne on koneellisesti tuettu ja niitä kuormitetaan koko matkalta tasaisemmin. Pölkkyjen 5 ja 8 eri päiden painumissa on havaittavissa eroa, mutta se johtuu puhtaasti siitä, että junat ovat kaikilla mittauskeroilla kulkeneet suoraa reittiä, jolloin poikkeavalla raiteella olevat anturit S10 ja S16 ovat todellisuudessa kauempana varsinaisesta kuormituksesta. Anturit haluttiin asentaa sinne, jotta voitaisiin seurata poikkeavankin raiteen kehittymistä, mutta normaalitilanteessa junat eivät käytä näiden vaihteiden poikkeavia raiteita.

Näiden yksittäisten pölkkyjen mittaustuloksista ei pysty vetämään suuriakaan johtopäätöksiä pohjainten merkityksestä. Pohjaimellisen radan pölkkyssä 4 on suuremmat palautuvat painumat kuin pohjaimettoman radan vastaavassa pölkkyssä 2, mutta muissa vastaavissa pareissa (1 ja 3, 5 ja 8, 6 ja 7) tällaista selkeää trendiä ei ole nähtävissä.

## 4.2 Radan pysyvä painuma

Radan palautuvan painuman ohella pohjaimen hyötyjä tulee tutkia myös radan pysyvän painuman kautta. Pohjaimen myötä pölkyn ja sepelin välinen kontaktipinta-ala kasvaa, jolloin sepelin murskautumisen ja hienontumisen oletetaan pienenevän ja tätä kautta myös pysyvä painuma voisi hidastua. Tätä asiaa voidaan tutkia samoilla piste-mäisillä antureilla, joiden avulla arvioitiin jo edellisessä luvussa radan palautuvaa painumaa.

Pysyvää painumaa on mitattu kaikilla 16 anturilla kolmen tunnin välein noin kahden vuoden aikajaksolla 06/2015 – 05/2017. Tämän datan perusteella saadaan kattava kuva eri koevaihteiden painuman kehityksestä. Kuva 17 havainnollistaa kaikkien 8 mittapölkyn pysyvää painumaa kummastakin päästä mitatun tuloksen keskiarvona koko mittausajanjaksolla. Sama kuvaaja on myös suuremmassa koossa liitteessä 2.



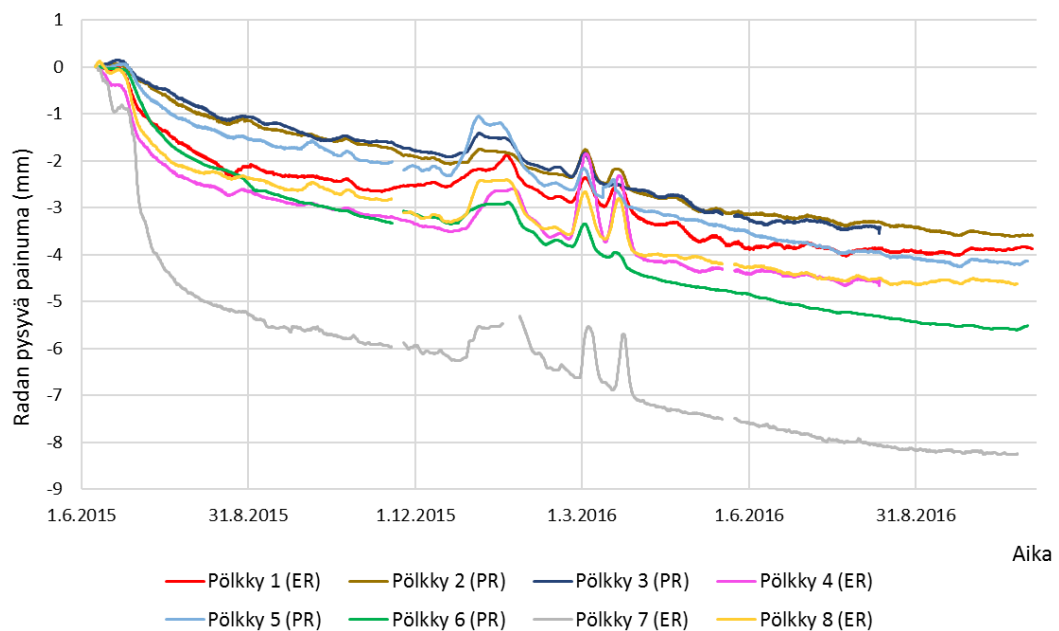
Kuva 17. Radan palautuva painuma kaikista 8 mittapölkystä mitattuna aikavälillä 06/2015 – 05/2017.

Pysyvän painuman kuvaajasta voidaan välittömästi havaita, että alue on kokonaisuudessaan tuettu marraskuussa 2016 ja tällöin rataa on nostettu hieman pölkystä riippuen noin 10 - 20 mm. Nostot ovat siis moninkertaisia suhteessa radalla syntyneeseen painumaan, jolloin tarkempien analyysien tekeminen suuren skaalan takia on tämän kuvan pohjalta hyvin vaikeaa. Tästä syystä kuvissa 18 ja 19 on esitetty radan pysyvä painuma erikseen ennen tukemista ja tukemisen jälkeen, joka mahdollistaa tarkemman analyysin painuman suuruudesta eri pölkkyissä. Muut kuvissa 17-19 näkyvät rataraken-



teen positiivisen suunnan muutokset johtuvat joka keväisin tapahtuvasta routanoususta, joka on noin 1 mm luokkaa ja palautuu ajan myötä, eli sen vaikutus on periaatteessa hyvin pieni kokonaisuuden kannalta.

Kuva 18 osoittaa, että pölkkyjen painuma on ollut ensimmäisen 2 kuukauden ajalla voimakkaampaa ja hyvinkin yksilöllistä, joka on siis täysin odotettua uudella rataosuudella, jossa pölkkyt hakevat lopullisen asemansa liikenteen aloittamisen jälkeen. Tällä 2 kuukauden ajanjaksolla pölkkyjen painumissa on selkeästi eroja ja nämä erot ovat hyvinkin vahvasti liitoksissa siihen, käytetäänkö pölkkyssä pohjainta vai ei. Pölkkyjen väliset painumaerot näkyvät vielä selkeämmin taulukossa 3, jossa koko mittausjakso on jaettu kolmeen eri aikaväliin. Ensimmäinen kuvaa aikaa ennen liikenteen aloittamista, toinen pölkkyjen 2 kuukauden asettumisjaksoa ja kolmas normaalia käyttöjaksoa ennen radalla suoritettua tukemista.



Kuva 18. Radan pysyvä painuma kaikista 8 mittapölkkyistä mitattuna aikavälillä 06/2015–10/2016.

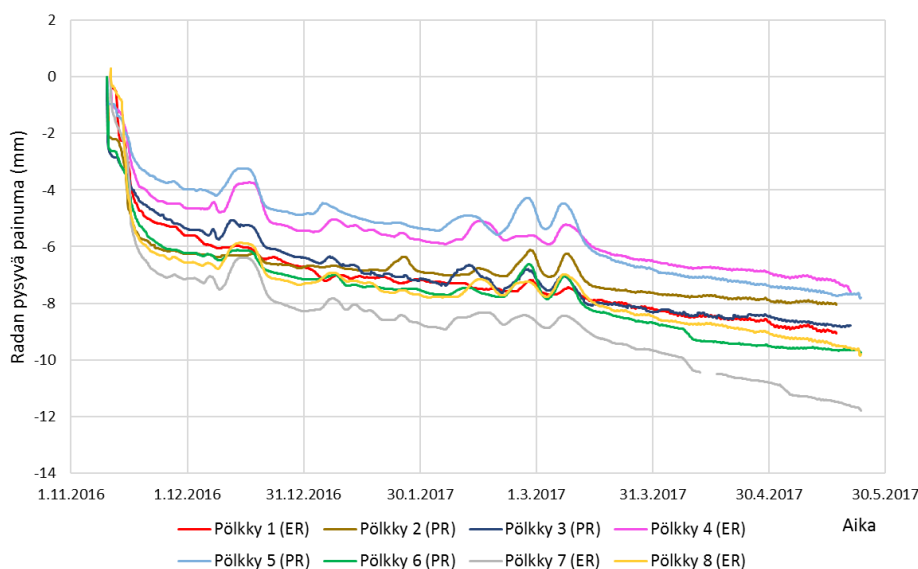
Sekä kuvasta 18 että taulukosta 3 nousee selkeästi esiin pölkky 7, johon on muodostunut 2 kuukauden liikenteellä olon jälkeen jo yhteensä yli 5 mm pysyvää painumaa. Kyseessä on siis vaihteen V617 risteyspölkky, jonka tukeminen on saattanut asennuksen yhteydessä jollakin tapaa epäonnistua ja pysyvä painuma on tämän seurausta. 2 kuukauden alkujakson jälkeen pysyvä painuma on tässäkin pölkkyssä kuitenkin hieman tasoitunut ja taulukko 3 osoittaa sen käyttäytyvän tämän jälkeen muiden pölkkyjen tapaan.

Huomattavasti tätä yksittäisen pölkyn pysyvää painumaa oleellisempaa on huomata kokonaisuutena pohjoisen ja eteläisen raiteen pölkkyjen erot. Taulukko 3 osoittaa, että ennen liikenteen aloittamista pohjoisen raiteen pohjaimettomissa pölkkyissä ei ole lainkaan pysyvää painumaa, mutta eteläisen raiteen pohjaimelliset pölkkyt ovat painuneet jo tänäkin aikana. Tämä johtuu kuitenkin todennäköisesti pelkästään siitä seikasta, että radan viimeistelyn aikana pohjoinen raide on ollut vielä suljettuna ja kaikki työmaaliikenne on kulkenut eteläistä raidetta pitkin. Tämä ajanjakso ei siis anna vielä täyttää kuvaa eri rakenteiden käyttäytymisestä.

Taulukko 3. Pölkkyjen pysyvä painuma kolmella eri mittausjaksolla. ER = eteläinen raide pohjaimella ja PR = Pohjoinen raide ilman pohjainta.

Pölkky	11.6. - 30.6.2015	1.7. - 31.8.2015	1.9.2015 - 3.11.2016
1 (ER)	-0,37	-1,88	-2,04
2 (PR)	0	-1,15	-2,61
3 (PR)	0	-1,09	-2,72
4 (ER)	-0,85	-1,93	-2,25
5 (PR)	0	-1,56	-2,77
6 (PR)	0	-2,29	-3,10
7 (ER)	-1,50	-3,79	-3,01
8 (ER)	-0,62	-2,08	-2,31

Liikenteen aloittamisen jälkeen rakenne-erot alkavat kuitenkin heti näkyä. Heinäkuun alusta lähtien kummallakin raiteella on ollut täysin tasainen kuormitus, mutta silti eteläisen raiteen pölkkyt ovat painuneet ensimmäisen kahden kuukauden aikana jopa 70 % enemmän kuin vastaavat pohjoisen raiteen pölkkyt. Tämä on ihan merkittävä ero ja johtuu juuri siitä, että sepelirakeet painautuvat kuormituksen alkuvaiheessa pehmeään pohjaimen sisään lisäten pölkyn pysyvää painumaa. Sama ilmiö toistuu kaikissa pölkkyjen vertailupareissa. Pohjaimellisella pölkyllä kestää siis huomattavasti kauemmin hakea oma lopullinen tiivistynyt asemansa sepelitukikerroksessa, jota voitaisiin pitää periaatteessa negatiivisena asiana. Tämä painuminen kasvattaa kuitenkin koko ajan pölkyn ja sepelin välistä tehokasta kontaktipinta-alaa ja johtaa taulukon 3 mukaisesti lopulta siihen, että kahden ensimmäisen kuukauden jälkeen pohjaimellisten pölkkyjen painumat ovatkin jo selkeästi pienempiä kuin pohjaimettomien pölkkyjen. Pohjaimien hyödyt tulevat esiin siis nimenomaan pidemmällä aikavälillä, mutta tässä tapauksessa asiaa ei voitu analysoida pidemmälle, kun kummatkin raiteet tuettiin marraskuussa 2016. Tällöin koko painumisprosessi käynnistyy tietyllä tapaa alusta, kun sepelirakeita liikutetaan ja sepelikerroksen pinta ei enää vastaa pohjaimen pinnanmuotoja. Tämä tukemisen jälkeinen pysyvän painuman kehittyminen on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Radan pysyvä painuma kaikista 8 mittapölkystä mitattuna aikavälillä 11/2016–5/2017.

Kuten kuvasta 19 huomataan, kaikki pölkyt painuvat todella rajusti heti tukemisen jälkeen, joka on täysin normaalia ratarakenteen tiivistymistä. Jo viikon jälkeen pölkyt ovat painuneet noin 3-6 mm siitä asemasta, johon ne tukemiskoneen jäljiltä jäivät. Tätä nopeampaa painumisjaksoa voi verrata kuvan 18 ja taulukon 3 mukaiseen ensimmäisen 2 kuukauden tilanteeseen, jossa koko ratarakenne oli täysin uusi ja käytännössä kuormittamaton. Silloin painumat olivat pölkyä 7 lukuun ottamatta huomattavasti maltillisempia ja tapahtuivat hitaammin. Alusrakenne ja päällysrakenteen pohja ovat siis tässä kohtaa jo hyvinkin tiiviitä ja tukeminen vaikuttaa ainoastaan pintakerrokseen, jolloin palataan nopeammin tasaisen painuman tilanteeseen. Tätä tasaisen painuman vaihetta (1.12.2016-) voidaan analysoida paremmin taulukon 4 avulla.

*Taulukko 4. Pölkyjen pysyvä painuma tukemisen jälkeen kahdella eri ajanjaksolla. ER = eteläinen raide pohjaimella ja PR = Pohjoinen raide ilman pohjainta.*

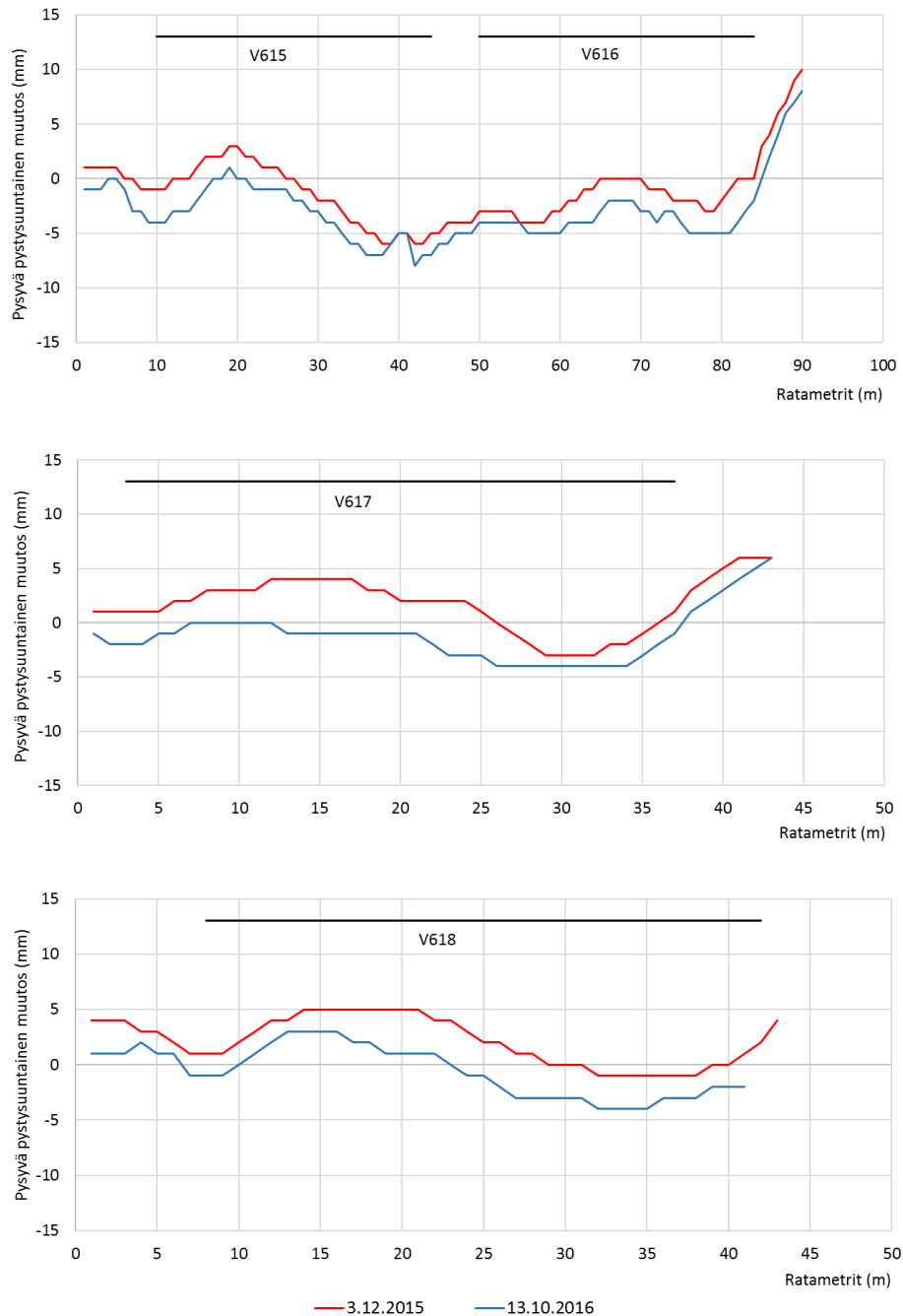
Pölky	11.11. - 30.11.2016	1.12. - 22.5.2017
1 (ER)	-5,19	-3,45
2 (PR)	-5,74	-1,72
3 (PR)	-5,31	-3,18
4 (ER)	-4,64	-3,60
5 (PR)	-3,36	-3,43
6 (PR)	-6,25	-3,34
7 (ER)	-5,45	-4,51
8 (ER)	-6,55	-3,04

Taulukon 4 avulla nähdään, että tasaisen painuman jaksolla suurin osa antureista on painunut toukokuuhun mennessä hyvinkin tasaisesti noin 3-4 mm. Pölkyssä 2 painuma on kuitenkin vain puolet yleisestä tasosta, joten tämä yksittäinen pölky tai sitä ympäröivä alue on selkeästi tukeutunut alkupainumien jälkeen muita tehokkaammin. Pölky 7 on vuorostaan painunut selkeästi muita pölkyjä voimakkaammin. Kuvaa 19 tarkastelemalla kuitenkin nähdään, että pölky 7 painuma ei ole ollut merkittävästi voimakkaampaa vielä ennen huhtikuuta 2017, mutta sen jälkeen painumassa tapahtuu kaksi nopeampaa romahdusta (7.4.-10.4.2017 ja 2.5.-5.5.2017), joiden aikana rakenne painuu yhteensä noin 0,8 mm. Ilman näitä kahta nopeaa painumajaksoja pölky 7 pysyvä painuma oli siis muiden pölkyjen tasolla. Huhtikuun nopea painumajakso on havaittavissa myös pölkyssä 6, jotka ovat hyvin lähellä toisiaan. Siirtymä mittaavan mittalaitteen sisäänrakennettu lämpötila-anturi osoittaa, että 6.4.2017 lämpötila on nousut aamun aikana (klo 06-12) nopeasti auringonpaisteen vaikutuksesta yli 20 celsiusastetta, eli kyseessä on todennäköisesti vaihteiden V617 ja V615 risteysalueella tapahtuva nopea ja hyvin paikallinen päällysrakenteen sulaminen, joka saa aikaan rakenteen painuman. Tämän jälkeen pölky 6 on säilyttänyt erityisen hyvin asemansa, mutta pölky 7 kohdalla painuma on jatkunut ja samanlainen sulamisilmiö on tapahtunut vielä uudelleen toukokuussa. Lämpötila-anturit tukevat hyvin tätä teoriaa, sillä toukokuun ensimmäisellä viikolla lämpötilat ovat päivällä auringossa kohonneet jopa 30 asteeseen huhtikuun lopun ollessa huomattavasti kylmempi.

Yleisellä tasolla kuva 19 ja taulukko 4 osoittavat siis sen, että marraskuun 2016 tukemisen jälkeen ei ole enää nähtävillä selkeitä painumaeroja pohjaimellisten ja pohjaimettomien pölkyjen välillä, kuten liikenteen avautuessa heinäkuussa 2015. Tukeminen siis tietyllä tapaa heikensi pohjaimien vaikutusta, kun tukikerroksen ja uuden pohjaimen välille hiljalleen muodostunut tehokas kontaktipinta-ala katosi. Pohjaimen

pinta on muokkaantunut tämän alkuperäisen kontaktin mukaisesti, jolloin uuden kontaktipinnan muodostuminen ei ole enää yhtä tehokasta. Pölkyn alapinta on siis pohjajaimellisella radalla muokkautuva, jolloin tukemisen tarpeellisuutta pitäisi aina pohtia todella huolellisesti.

Tukemisen vaikutuksia ja tarpeellisuutta voidaan arvioida myös vaihteista mitattujen absoluuttigeometrioiden perusteella. Kuten luvussa 3.2 on todettu, testivaihteita on mitattu jatkuvaan takymetrimittaukseen perustuvan Rami-wagonin avulla, joista saadut tulokset vaihteiden suorilla reiteillä on esitetty kootusti kuvassa 20.

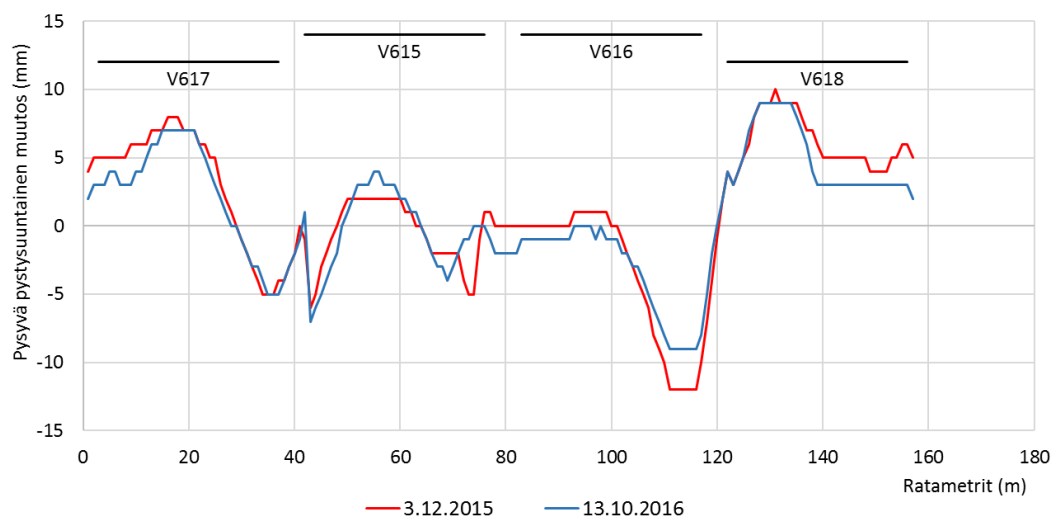


Kuva 20. Rami-wagonilla mitattu radan pysyvä pystysuuntainen muutos testivaihteiden suorilla reiteillä kahtena eri ajankohtana.

Radan pysyvän painuman mittaustuloksia on analysoinnissa verrattu täysin teoreettisen suoraan rataan, jonka korkeuspoikkeama on koko vaihteen matkalla tasan 0. Kuvan 20 kuvaajat esittävät koevaihteiden suoran puolen ulkokiskon absoluuttiaseman. Se osoittaa, että vaihteiden pystygeometria on ollut jo ensimmäisellä mittauskerralla hieman epätasainen kiskon absoluuttiaseman vaihdellessa -6 mm ja 5 mm välillä. Yleisellä tasolla pystygeometrian muutokset ovat kaikissa koevaihteissa hyvin maltillisia, eikä vaikuta siten merkittävästi vaihteiden toimintaan. Muutokset ensimmäisen ja jälkimmäisen mittauksen välillä ovat myöskin kauttaaltaan hyvin tasaisia ja osoittavat juuri samanlaista painumaa, kuin edellä esitetyt pistemäisten anturien tuloksetkin.

Vaihteen V616 takajatkosalueella on kuitenkin havaittavissa merkittävä 10 mm pystygeometrian poikkeama, joka tapahtuu todella nopeasti vain 7 metrin matkalla. Geometriamuutos on analysointitulosten perusteella kuitenkin vain yhdensuuntainen, jolloin laskennallinen korkeuspoikkeama 5 metrin mittakannalla on vain noin 1–2 mm luokkaa. Tämä ei ole siis vielä näiden tulosten pohjalta merkittävä korkeuspoikkeama, vaikka geometria muuttuukin voimakkaasti. Mittaustulokset kuitenkin loppuvat juuri tuon muutoksen kohdalle, joten virhealueen laajuudesta ja geometrian muutosnopeudesta ei näiden tulosten pohjalta saada täyttä varmuutta.

Suorien reittien ohella samat mittaukset tehtiin myös vaihteiden poikkeavilla reiteillä, jotka pystyttiin ajamaan kaikki samalla mittauskerralla. Tämä yhtenäinen on tulos on havainnollistettu kuvaan 21, joka kuvaa vaihteiden käyrän reitin ulkokiskon absoluuttiasemaa.

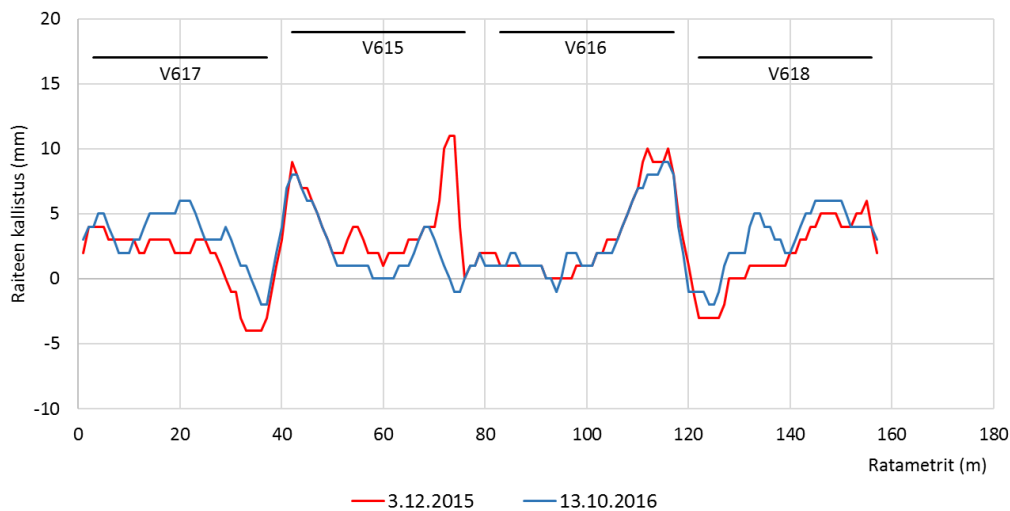


*Kuva 21. Rami-wagonilla mitattu radan pysyvä pystysuuntainen muutos testivaihteiden poikkeavilla reiteillä kahtena eri ajankohtana.*

Kuvan 21 pystygeometriasta havaitaan, että kummallakin poikkeavan raiteen osuudella geometria muuttuu merkittävästi. Geometriamuutokset eroavat suoran raiteen tilanteesta juuri siinä, että poikkeavalla raiteella muutokset ovat kahdensuuntaisia, eli geometria käy tietystä arvossa ja palaa nopeasti takaisin. Nämä edestakaiset muutokset luovat rataa korkeuspoikkeamaa, joka pahimmillaan vaihteen V615 risteysalueen kohdalla on 5 metrin mittakannalla laskettuna yli 5 mm. Liikenneviraston määrittelemissä raiteentarkastustuloksissa (Ratahallintokeskus 2005) tämä määritellään Kehäradan kunnossapitoluokan 1 mukaisesti D-luokan virheeksi (D-luokan virheraja 5 mm,

\* -luokan virheraja 8 mm), joka tarkoittaa lähitulevaisuudessa korjausta vaativaa virhettä. Vaihteiden V616 ja V618 väliin on muodostunut yksi amplitudiltaan suurempi painuma, mutta se on laajemmalla alueella, jolloin laskennallinen korkeuspoikkeama jää olemattomaksi. Vaihteiden suorilta osuuksilta tulokset näyttävät vastaavilta kuin kuvassa 20. Nämäkin tulokset päättyvät jälleen hyvin lähelle vaihteiden V617 ja V618 kärkiä, jolloin geometrian jatkuvuutta alueen yleiseen tasoon verrattuna on vaikea arvioida.

Alueella ei ole radantarkastustulosten (2014–2017) perusteella kuitenkaan havaittu koko käyttöaikana lainkaan korkeuspoikkeamaa, mutta vaihteiden V617 ja V618 etujatkosalueella sekä vaihteen V616 takajatkosalueella on havaittu useampaan kertaan D-luokan kallistusvirhettä. Tämä tarkoittaa, että on syytä tutkia myös toisen kiskon asemaa, eli raiteen kallistusta. Rami-wagonin mittaama raiteen kallistus kuvaa 21 vastavalla vaihteiden poikkeavilla reiteillä on havainnollistettu kuvassa 22.



Kuva 22. Rami-wagonilla mitattu radan kallistus testivaihteiden poikkeavilla reiteillä kahtena eri ajankohtana.

Kuvaa 22 tarkastelemalla voidaan nähdä, että raiteen kallistuksen arvot muuttuvat selkeästi juuri samoissa raiteenvaihtokohdissa, joissa kuvan 21 mukaan on havaittavissa korkeuspoikkeamaa. Nämä poikkeamat ovat itseasiassa vastakkaisen merkkisiä korkeuspoikkeamiin verrattuna, joka tarkoittaa käytännössä sitä, että nämä kumoavat toisensa ja lopulta toinen kisko on paremmassa geometriassa. Kyseessä on siis todellisuudessa enemmänkin raiteen kallistusvirhe kuin korkeuspoikkeama.

Oli kyseessä kumpi tahansa näistä virheistä, ne antavat syyn radan tukemiselle, joka suoritettiininkin käytännössä heti jälkimmäisen mittauksen jälkeen marraskuussa 2016. Tukemisen vaikutukset pölkkyjen pystygeometriaan on näkyvissä kuvassa 17, josta huomataan, että pölkkyjen nostomäärät eroavat hyvin paljon toisistaan. Taulukossa 4 esitettyjen nopeiden alkupainumien jälkeen pölkyn 2 pystysuuntainen asema muuttui tuennassa lopulta vain 1,5 mm, mutta samalla pölkyn 5 asema muuttui jopa 17 mm. Vaihteiden absoluuttigeometriasta kertovat tulokset (kuvat 20–22) eivät anna syytä näin suurille muutoksille, joten vaihteiden tukemisen vaikutuksia geometrialle pitäisi selkeästi tutkia vielä lisää tulevaisuudessa.

## 4.3 Risteysalueen pölkyn taipuma

Pohjainten hyötynäkökohtia tarkasteltaessa yksi mielenkiintoinen tutkimuskohde on risteyskärjen alla olevat pitkät pölkkyt. Nämä pölkkyt altistuvat risteyskärjen epäjatkuvuuskohdan luomien kuormituspiikkien vaikutuksesta hyvin epätasaisille raskituksille, jolloin sepeli pölkyn alla heikentyy epätasaisesti ja pölkky pääsee taipumaan. Pohjainten avulla kuormitusten voisi olettaa siirtyvän tukikerrokseen tasaisemmin myös pölkyn pituussuunnassa. Tätä asiaa tutkittiin luvussa 3.3 esitetyllä tavalla mittaamalla pölkyn numero 52 yläpintaan kohdistuvia veto- ja puristuskuormituksia liikenteen alaisena 5 eri pisteestä. Ensimmäinen mittaus suoritettiin sulan maan aikana marraskuussa 2015 ja seuraava vertailumittaus toukokuussa 2017. Taulukko 5 esittää näiden mittaustulosten avulla lasketut taivutusmomentit kaikkien testivaihteiden risteyspölkkyssä sekä niiden itseisarvon muutoksen mittausten välillä. Muutoksen arvot on korostettu väreillä siten, että vihreän sävyt kuvaavat momentin itseisarvon pienenemistä (arvo < 0) ja punaisen sävyiset värit momentin itseisarvon kasvamista (arvo > 0).

Taulukko 5. Testivaihteiden risteyspölkkyjen (pölkky 52) taivutusmomentit viidestä eri mittauspisteestä marraskuussa 2015 ja toukokuussa 2017.

Momentti (kNm)		Anturi 1	Anturi 2	Anturi 3	Anturi 4	Anturi 5
V615	2015	0,37	-0,95	1,46	2,63	4,90
	2017	0,66	-2,78	-2,78	1,83	5,55
	muutos	0,29	1,83	1,32	-0,80	0,66
Momentti (kNm)		Anturi 1	Anturi 2	Anturi 3	Anturi 4	Anturi 5
V616	2015	0,44	1,46	2,27	4,90	5,33
	2017	0,51	1,17	1,75	4,82	4,75
	muutos	0,07	-0,29	-0,51	-0,07	-0,58
Momentti (kNm)		Anturi 1	Anturi 2	Anturi 3	Anturi 4	Anturi 5
V617	2015	0,44	-1,39	-1,17	0,84	1,90
	2017	0,44	-1,83	-1,17	2,34	2,92
	muutos	0,00	0,44	0,00	1,50	1,02
Momentti (kNm)		Anturi 1	Anturi 2	Anturi 3	Anturi 4	Anturi 5
V618	2015	0,58	-1,61	-0,66	1,32	3,87
	2017	0,51	-0,73	1,39	3,29	5,77
	muutos	-0,07	0,88	-0,73	1,97	1,90

Näiden pölkyn momenttien analysoinnissa täytyy ottaa heti lähtökohtaisesti huomioon se, että kaikki testivaihteet on tuettu marraskuussa 2016. Tuentatilan pölkkyjen alla on siis varmuudella vaihtunut seurantajakson aikana ja tästä syystä näiden tulosten perusteella ei pystytä valitettavasti vetämään mitään johtopäätöksiä radan pitkäaikaiskäytännöstä ja pohjainten merkityksestä, vaan tarkastelemaan ainoastaan kahta erillistä mittausta ja arvioimaan raskitusten absoluuttista suuruutta, taipumamuotoja sekä tukemisen tehokkuutta.

Taulukosta 5 nähdään, että noin puolissa antureista momentit ovat pienentyneet ja puolissa kasvaneet seurantajakson aikana. Nämä antavat siis hieman ristiriitaista tietoa tukemisen onnistumisesta. Eniten tukemisen vaikutus näkyy vaihteissa V615 ja V618, joissa momentin suunta on muuttunut anturin 3 kohdalla, eli pölkyn keskellä. Tämä tarkoittaa pölkyn pohjapainejakautuman selkeää muutosta. Ensimmäisen mittauksen aikaan vaihteen V615 risteyspölkky ei kantanut pölkyn keskeltä, jolloin pölkkyyn kohdistui risteyskärjen pyöräkuorman muodostamaa positiivista momenttia myös pölkyn keskiosalla. Tukemisen jälkeen toinen mittauskerta osoittaa, että pölkky tukeutuu nyt enemmän pölkyn keskiosalta. Vaihteessa V618 tilanne menee juuri toisinpäin, eli alkuvaiheessa tuenta on pölkyn keskiosalla tehokkaampaa kuin toisella mittauskerralla.

Päähuomiona taulukosta 5 nähdään kuitenkin se, että pölkyn suurimmat rasitukset keskittyvät kummallakin mittauskerralla selkeästi risteyskärjen alueelle, joka on dynaamisista kuormituksista johtuen varsin odotettu tulos. Anturit sijoitettiin 80 mm risteyskärjen kummallekin puolelle, joten ne eivät mitanneet pölkyn rasitusta suoraan risteyskärjen alta, jossa se on siis vielä jonkin verran mitattuja arvoja suurempi. Mitatut absoluuttiarvot kiskojen vierestä jäävät kuitenkin suurimmillaankin vain noin 4-6 kNm tasolle, joka indikoi sitä, että kuormitukset kiskon allakaan eivät ole kriittisellä tasolla pölkyn halkeamisen kannalta. Betoniratapölkyn tekniset toimitusehdot (Ratahallintokeskus 2008) määrittävät, että kaikkien betonipölkkyjen tulee kestää staattisissa kokeissa kiskon kohdalta 17 kNm momentti ja pölkyn keskiosallakin -12 kNm momentti ilman minkäänlaisia halkeamia. Nämä määritelmät on tehty lähinnä linjapölkkyjä varten, joiden poikkileikkausprofiili kapenee pölkyn keskellä. Vaihdepölkkyt ovat poikkileikkausprofiililtaan vakioita ja ulkomitoiltaan suurempia kuin linjapölkkyt, joten ne kestävät vähintään nämä kuormitukset halkeamatta.

Taivutusmomenttien arvioinnissa täytyy tietenkin ottaa huomioon myös se, että Sm5-junien suurimmat akselikuormat ovat vain 13 tonnia, eli kuormitus on alle 60 % radalle sallittavasta maksimikuormasta. Lineaarisesti laskettuna tämä tarkoittaisi noin 10 kNm taivutusmomentteja maksimikuormalla. Tällöinkin varmuus pölkyn halkeamista vastaan on vielä hyvällä tasolla.

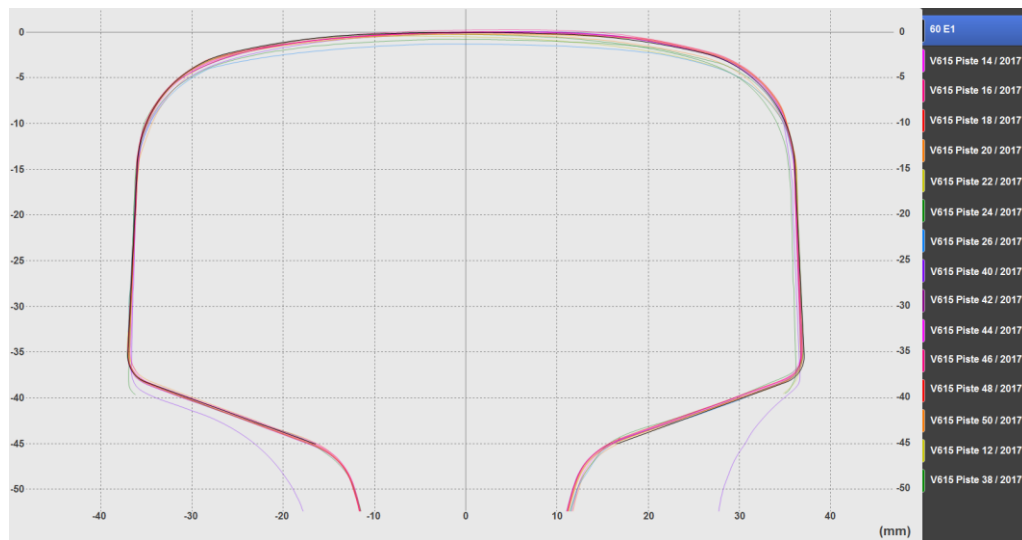
## 4.4 Kiskojen ja risteysalueen kuluminen ja muodonmuutokset

Rakenteen painuman ohella Kehäradan koevaihteista mitattiin myös kiskorakenteen kulumista. Näiden profiilien mittaamiseen käytettiin luvussa 3.4 esiteltyjä fyysiseen mittapähän perustuvaa Miniprof-mittalaitetta sekä lasertoimista Calipri-mittalaitetta, jolla saatiin mitattua kuvan 10 mukaiset mittapistet jokaisesta vaihteesta kesäkuussa 2015 sekä toukokuussa 2017.

Profiilit analysoitiin Greenwood Engineeringin kehittämällä Miniprof Envision -ohjelmistolla. Profiilit jaettiin kolmeen eri ryhmään siten, että kielialueen, välikiskoalueen ja risteysalueen profiilit analysoitiin erikseen, koska profiilin muodot eroavat näillä alueilla hyvin paljon toisistaan. Tämän lisäksi vasemman ja oikean puolen kiskot analysoitiin erikseen, jotta kielialueellakin profiilit vastaavat täysin toisiaan. Tämä jaolla pystyttiin varmistamaan myös se, että yhdessä analyysissä oli aina alle 20 profiilia, jolloin kuvat säilyivät luettavampina. Välikiskoalueella profiilien kulumista tarkasteltiin lähtökohtaisesti vertailemalla jälkimmäisen 2017-vuoden mittauksen tuloksia suoraan

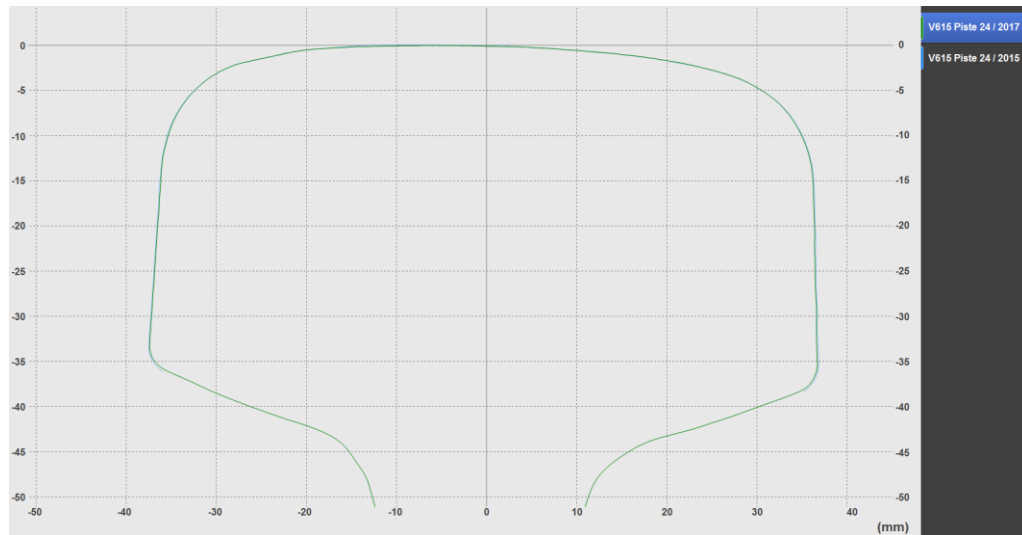


referenssinä toimivaan 60E1-kiskoon. Kuvassa 23 on esitetty tällainen vertailu vaihteen V615 kärjestä katsottuna oikean puolen välikiskoista.



Kuva 23. Vaihteen V615 kärjestä katsottuna oikean puolen välikiskoalueen kiskoprofiilit toukokuun 2017 mittauksesta.

Kuvasta 23 voidaan havaita, että suurimmassa osassa kiskoista ei ole käytännössä lainkaan kulumista ja ne seuraavat täysin referenssinä toimivan 60E1-kiskon profiilia (musta viiva). Muutama profiili erottuu hieman tästä joukosta oikeastaan koko kulupinnan osalta, joten näitä profiileja voidaan tarkastella tarkemmin vuoden 2015 mittauksen perusteella. Kuva 24 havainnollistaa profiilin muotoa mittauspisteessä 24 kahdella eri mittauksella.

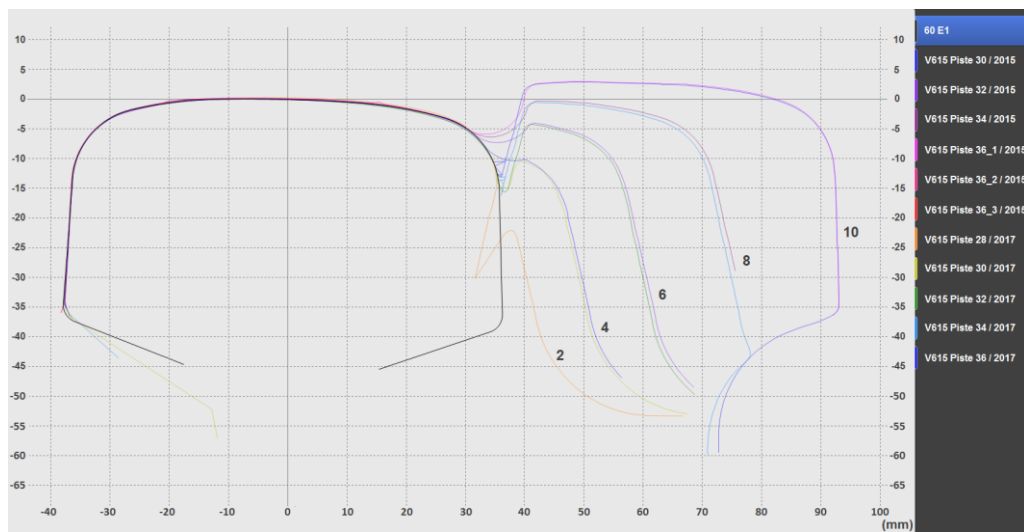


Kuva 24. Vaihteen V615 mittauspiste 24 profiilin muoto vuoden 2015 ja vuoden 2017 mittauksissa.

Kuten kuva 24 osoittaa, kyseinen profiili on kulunut todellisuudessa niin vähän, että sen muutosta on hyvin vaikea edes hahmottaa. Hahmottamisen vaikeutta lisää entisestään se, että analysointiohjelmisto käyttää profiileissa automaattisesti väripaletin vie-rekkäisiä värejä. Tämä eri mittauksien välinen tarkastelu kertoo siitä, että profiilien erot suhteessa 60E1-kiskoon eivät tarkoita suoranaisesti vielä sitä, että kisko olisi ku-

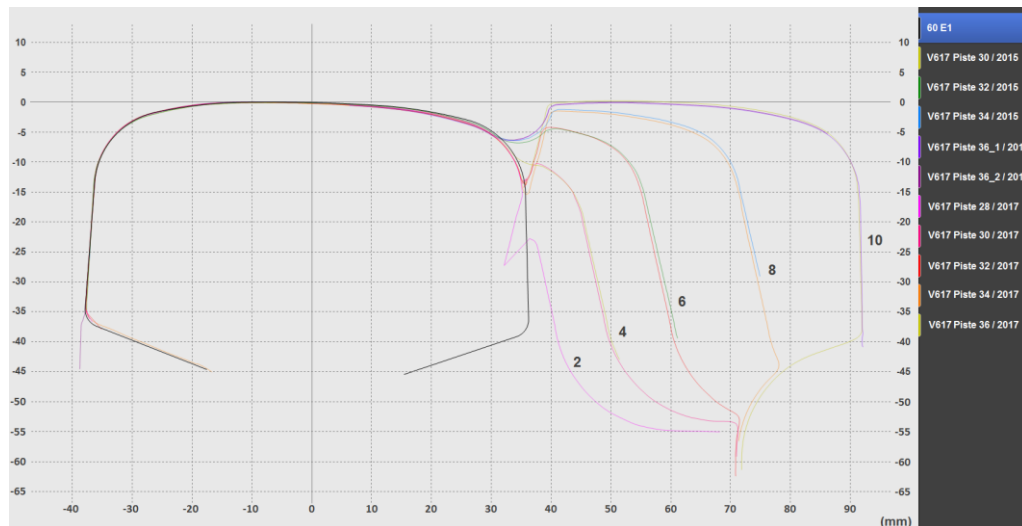
lunut. Standardissa [EN-13674-1, 2017] määritetään 60E1-kiskon korkeuden valmistustoleranssiksi  $-1,1-0,5$  mm. Kuvan 23 kaikki profiilit ovat näiden rajojen sisällä. Samalla tavalla analysoitiin myös muiden kolmen koevaihteen välikiskoalueiden profiilit ja nämä analyysit osoittivat, että jokainen näistä profiileista on valmistustoleranssin määrittämien rajojen sisällä. Voidaan siis todeta, että koevaihteet eivät ole merkittävästi kuluneet tai muutenkaan vaurioituneet välikiskoalueelta.

Toinen kiskojen kulumisen kannalta kiinnostava alue on vaihteiden kielisovitukset, joissa kulumisella ja geometrian muutoksilla on suuri vaikutus siihen, missä vaiheessa pyörä siirtyy kieleltä tukikiskolle. Vaihteen kielen ja tukikiskon muodostama yhteisprofiili mitattiin kuvan 10 mukaisesti radan pituussuunnassa viidestä eri kohdasta ja kuva 25 havainnollistaa vaihteen V615 käyrän puolen kielirakenteen muotoa näissä poikkileikkauksissa.



Kuva 25. Vaihteen V615 käyrän puolen kieliprofiilin muoto viidestä eri mittapisteessä vuonna 2015 ja vuonna 2017. Numerot 2–10 kuvastavat pölkynumeroita, joiden kohdalta profiilit on mitattu.

Kuvasta 25 voidaan havaita, että profiileissa ei ole tapahtunut oikeastaan lainkaan kulumista vuosien 2015 ja 2017 välillä ja tilanne on sama myös muiden vaihteiden kielisovituksissa. Profiilit ovat kohdistettu vertailuun tukikiskon ulkoreunan mukaisesti ja se osoittaa, että kielen asema ei ole aivan tarkalleen sama eri vuosien mittauksissa, mutta erot ovat vain millin kymmenyksiä, jolla ei ole varsinaista merkitystä. Huomattavasti merkittävämpää on kummallakin mittauskerralla näkyvä kielen korkeusero suhteessa tukikiskoon. Kuten voidaan nähdä, viimeinen pölkyn 10 kohdalta otettu profiili on noin 3 mm ylempänä kuin tukikisko, joka ei ole missään nimessä tarkoituksenmukaista. Tässä kohdassa kieli kantaa jo koko junakuorman ja sen pitäisi vaihdegeometrian mukaan olla täysin samalla tasolla viereisen tukikiskon kanssa, jotta pyörän siirtyminen tukikiskon ja kielen välillä on mahdollisimman sujuvaa. Kyseistä kielen korkeusasemaa voidaan vertailla vaihteesta V617 mitattuun käyrän puolen kielisovitukseen, joka on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Vaihteen V617 käyrän puolen kieliprofilin muoto viidestä eri mittapisteessä vuonna 2015 ja vuonna 2017. Numerot 2–10 kuvastavat pölkynumeroita, joiden kohdalta profiilit on mitattu.

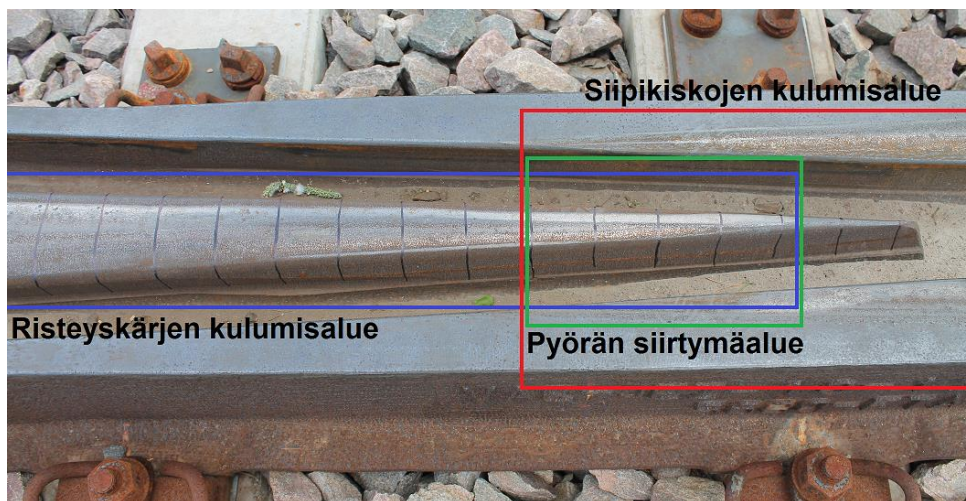
Kuten nähdään, tukikiskon ja kielen profiilit ovat vaihteessa V617 täysin samalla tasolla pölkyn 10 kohdalla, kuten pitääkin. Kuvia 25 ja 26 vertaillaessa voidaan havaita, että myös pölkyn 8 kohdalta mitattu profiili on vaihteessa V615 noin 1–1,5 mm ylempänä kuin vaihteessa V617. Vaihteen V615 käyrä kieli ei ole siis täysin oikeassa geometriassa näiden kummankaan pölkyn kohdalta. Tässä kohdassa tukikiskon ja kielen pienilläkin korkeuseroilla on valtava merkitys, koska pyörän siirtyminen epäjatkuvuuskohdan yli on suunniteltu tapahtuvan juuri tällä alueella, jossa kielen leveys ylittää 25 mm. Liian korkealla oleva kieli johtaa siihen, että pyörän siirtymäkohta muodostuu lähemmäksi kielen kärkeä, jolloin kielirakenne ei ole vielä riittävän leveä ja sitä kautta kantokykyinen. Tämä voi vuorostaan johtaa kielen vaurioitumiseen ja sitä kautta entistä suurempiin ongelmiin.

Vastaavat poikkileikkausprofiilit mitattiin myös muista vaihteista ja analysointi osoitti, että neljän koevaihteen kahdeksasta kielisovituksesta kolmessa oli tällainen kuva 25 vastaava yli 2 mm korkeusero pölkyn 10 kohdalla. Kyse ei ole siis yksittäisen kielisovituksen ongelmasta. Vaihteiden V616 ja V618 kohdalla ongelma esiintyi suoran puolen kielisovituksessa, joka on tiettyllä tapaa vielä huolestuttavampaa, kun otetaan huomioon, että näitä puolenvaihtopaikan vaihteita käytetään huomattavasti enemmän suorassa asennossa.

Syitä tällaiselle korkeuserolle voi tietysti olla moniakin, mutta todennäköisin niistä on pölkkyjen painuminen. Muutaman vierekkäisen pölkyn painumistilanteessa tukikisko seuraa luonnollisesti perässä pölkkyjen painon taivuttaessa kiskoa alaspäin, mutta liikkuva kieli makaa vaihdealuslevyn päällä ainoastaan omalla painollaan, jolloin se ei kuormittamattomassa tilanteessa jäykkyytensä ansiosta taivu yhtä paljon. Tämän teorian tosin vaatisi sen, että pölkkyt olisivat painuneet pituussuunnassa epätasaisesti, koska ongelma esiintyi näissä vaihteissa aina vain toisella puolella. Tämän teorian paikkansapitävyys tulisi todeta mittaamalla, onko kielen ja vaihdealuslevyn väliin muodostunut todellisuudessa rakoa, joka osoittaisi, että kieli roikkuu kuormittamattomana ilmassa. Tämän projektin puitteissa tällaisia mittauksia ei vielä tehty, mutta ne on mahdollista suorittaa tulevaisuudessa, jos seuranta alueella jatketaan.

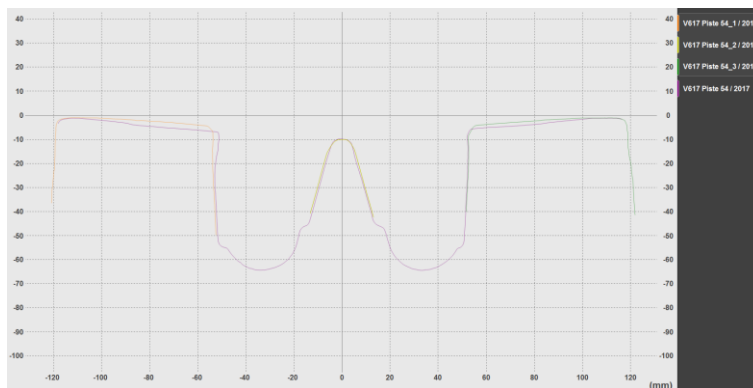
Tämä ongelma esiintyy siis sekä pohjaimettomassa että pohjaimellisessa vaihteessa, joten tällä seikalla ei ole ollut merkittävää vaikutusta asiaan. Jos ongelma kuitenkin johtuu edellä kuvatulla tavalla vaihdepölkkyjen epätasaisesta painumisesta, ongelman voidaan olettaa olevan pitkällä aikajänteellä pienempi pohjaimellisella radalla, jossa pölkkyt tukeutuvat sepeliin tehokkaammin.

Kolmas profiilien kannalta tutkittava vaihde-elementti on risteysalue, jossa mitattiin koko risteysosan profiilia 5 cm välein yhteensä 15 eri poikkileikkauksesta (ks. kuva 10), jotka ulottuivat täten risteyskärjestä 75 cm vaihteen kantaan päin. Tämä on riittävän suuri mitta-alue, jotta pystytään analysoimaan koko risteysosan siirtymäalue kaikilla kalustotyypeillä ja myös eri laippojen välisellä etäisyydellä. Risteysalueilla on havaittavissa pientä kulumaa, joka jakautuu selkeästi kahteen eri kategoriaan, eli siipikiskojen kulumiseen ja varsinaisen risteyskärjen kulumiseen. Alla on kuvassa 27 esitettynä kaikki 15 mittauspistettä, jonka lisäksi kuvaan on merkitty risteyskärjen ja siipikiskojen kulumisalueet ja niitä yhdistävä pyörän siirtymäalue.



Kuva 27. Vaihteen V615 risteysalueen mittauspisteet sekä risteyskärjen ja siipikiskojen kulumisalueet.

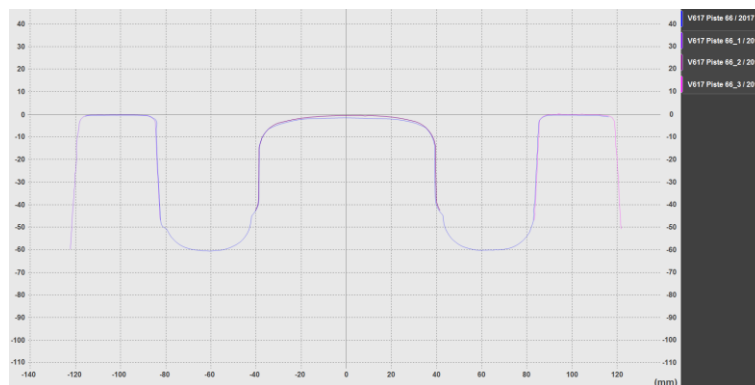
Kuvan 27 mukaisten kulumisalueiden perusteella analyysissä haettiin poikkileikkauksia, joissa kulumisen olisi suurimmillaan niin siipikiskoissa kuin risteyskärjessäkin. Kuvassa 28 esittää siipikiskojen voimakkainta kulumista vaihteen V617 mittauspisteessä 54.



Kuva 28. Vaihteen V617 risteyskärjen poikkileikkausprofiili mittauspisteessä 54 vaihteen kärjestä päin katsottuna.

Kuvasta 28 nähdään, että varsinkin risteyskärjen vasemmalla puolella olevassa siipikiskossa on tapahtunut kulumista sekä myös pientä muokkautumista 2 vuoden käytön aikana. Kuluminen juuri tällä puolella käy järkeen, sillä vaihde on vasenkätinen, jolloin vaihteesta suoraan ajavat junat käyttävät nimenomaan tätä siipikiskoa risteyskärjen ylitukseen. Siipikisko on kulunut melko tasaisesti, joka viittaa siihen, että pyörän ja kiskon välinen kontakti on ollut hallittu ja suunnitelman mukainen. Hallitusta kontaktista kertoo myös se, että varsinaisessa risteyskärjessä ei näy minkäänlaisia kulumisen merkkejä. Kaksipistekontaktilta siis vältytään vielä tässä poikkileikkauksessa, kuten kuvan 27 mukaisesti kuuluukin. Pystykuluminen on siipikiskossa noin 2 mm luokkaa, joka on vielä hyvin maltillista, eikä vaadi kummempia toimia. Siipikiskon noin 2 mm muokkautuminen sivusuunnassa on vuorostaan huomattavasti merkittävämpää, koska se vaikuttaa heti vaihteen i-mittaan, jonka kunnossapitotoleranssi laippauran kaventumisen suhteen on hyvin tiukka. RATO 14:n (Liikennevirasto 2017) mukaan vaihteen i-mitta saa kaventua pääraiteilla vain 1 mm, eli tässä tapauksessa kunnossapitotoleranssi ylittyy ja muodostunut purse pitäisi poistaa hionnan avulla. Vastaavat analyysit muissa vaihteissa osoittivat, että samanlaista pursetta on muodostunut myös vaihteen V615, eli hionnan tarvetta on sekä eteläisellä että pohjoisella raiteella.

Varsinaisen risteyskärjen mahdollista kulumista tulee vuorostaan analysoida risteyskärjen kannassa, jossa se kantaa yksin pyöräkuormat. Alla on esitetty kuvassa 29 saman vaihteen V617 risteysalueen poikkileikkauksen profiilia mittauspisteessä 66, jossa kuluminen on vaihteen V617 mitatuista profiileista voimakkainta.



Kuva 29. *Vaihteen V617 risteyskärjen poikkileikkausprofiili mittauspisteessä 66 vaihteen kärjestä päin katsottuna.*

Poikkileikkausprofiili kuvassa 29 osoittaa, että varsinaisen risteyskärjen kuluminen on voimakkaimmillaankin hyvin pienimuotoista, jolla ei ole vaikutusta risteyskärjen toimintaan. Minkään muunkaan vaihteen risteyskärjessä ei havaittu yli 1 mm kulumista, joten risteyskärjet ovat kestäneet pyöräkuormat näissä vaihteissa todella hyvin.

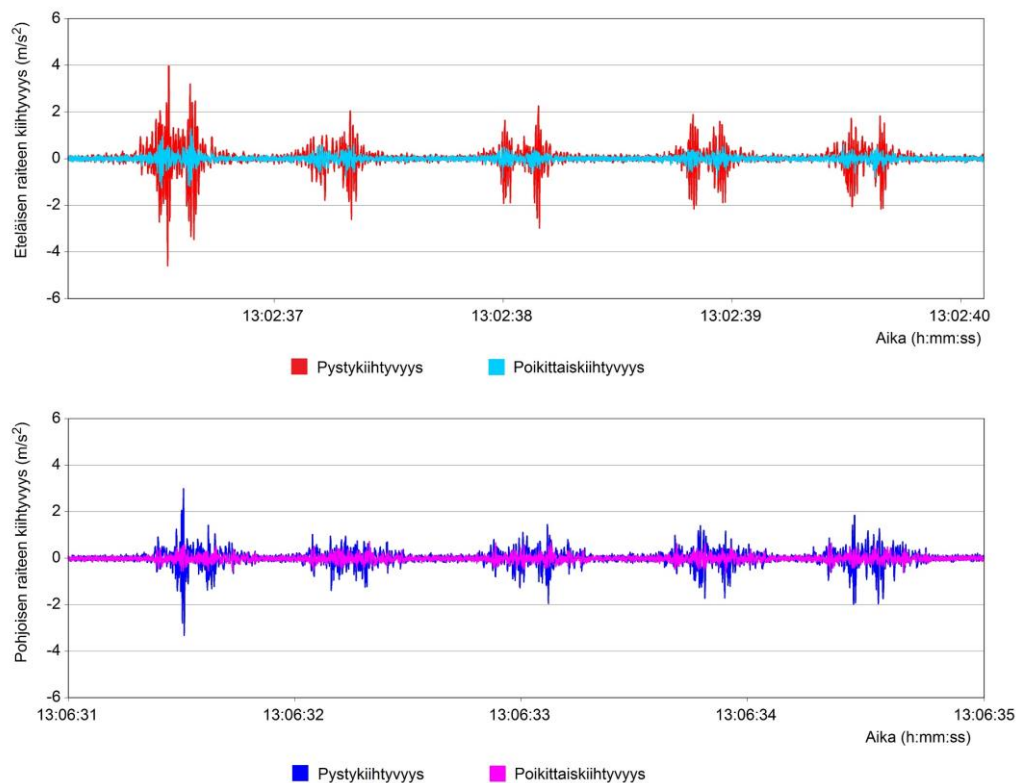
Yhteenvedona kiskojen ja risteysalueen kunnosta voidaan todeta, että yhdessäkään koevaihteessa ei ole näiden mittauksen perusteella havaittavissa merkittävää kulumista. Siipikiskoissa havaittiin laippavälystä pienentävää pursetta, joka olisi korjattavissa hionnalla. Lisäksi mittaukset osoittivat, että muutama kielisovitukseen on muodostunut kielen ja tukikiskon välistä korkeuseroa, joka voi johtaa siihen, että pyörä siirtyy tukikiskolta kielelle väärässä kohdassa, jossa kieli ei ole vielä riittävän tukeva vastaanottamaan pyöräkuormia. Pelkkien profiilimittausten avulla ilmiön varsinaista syytä on kuitenkin hyvin vaikea arvioida, joten asia vaatisi lisäselvittelyä.



## 4.5 Tukikerroksen värähtelyn mittaaminen

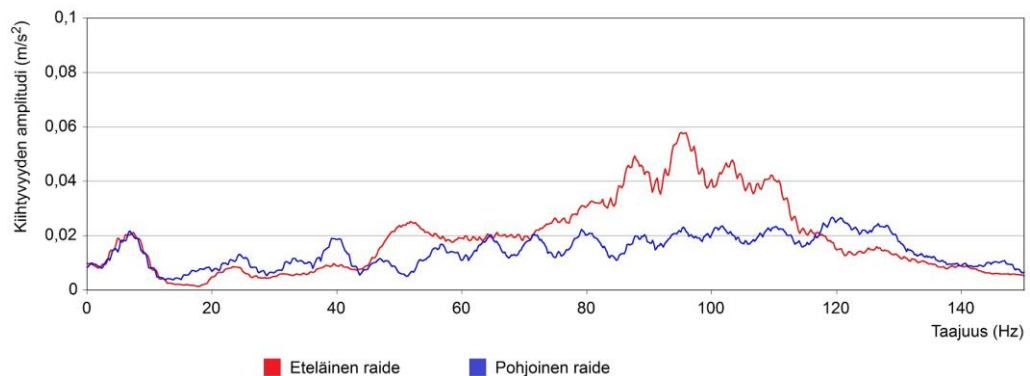
Kuten luvussa 3.5 kerrottiin, koevaihteissa mitattiin radan painumien ja kiskojen kulumisen lisäksi myös sepelitukikerroksessa syntyviä värähtelyitä, jotka saattaisivat synnyttää runkomelua läheisissä rakennuksissa. Kyseinen avoradalla sijaitseva koekohde ei erityisesti altista ympäristöä runkomelulle, mutta pohjainten vaikutuksia värähtelyyn on silti hyvä selvittää, jotta tiedetään, onko tämän tyyppisiä pohjaimia jatkossa tehokasta käyttää runkomelun ongelmakohteissa.

Värähtelyn etenemistä sepelissä mitattiin kolmesta eri pisteestä kuvan 11 mukaisesti. Suurimmat värähtelytasot muodostuivat luonnollisesti suoraan käytetyn raiteen alle. Tätä tilannetta havainnollistaa kuva 30, jossa on esitetty pystysuuntaisen kiihtyvyyden suuruus kummallakin raiteella erikseen Sm5-junan ylittäessä mittauspaikat. Kaikki anturit on sijoitettu sepeliin korkeustasolle kv -30 cm.



Kuva 30. Eteläisen (pohjain) ja pohjoisen (ei pohjainta) raiteen alla sepelitukikerroksessa (kv -30cm) syntyvä pystysuuntainen ja poikittaissuuntainen kiihtyvyys Sm5-junan ylittäessä kyseisiä raiteita.

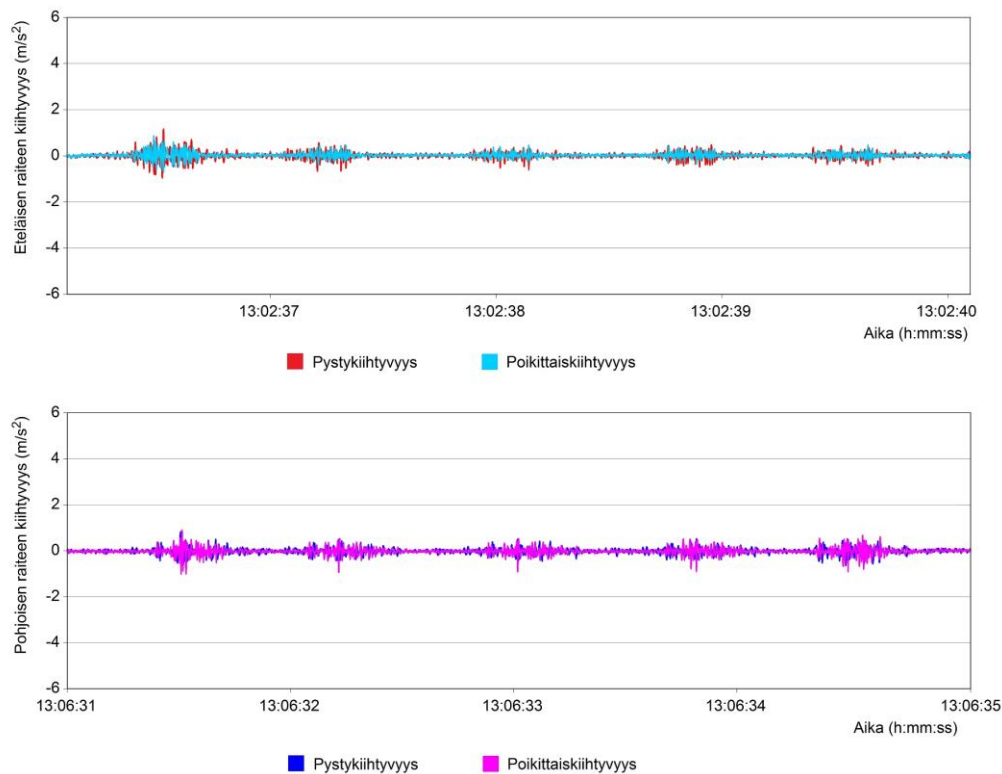
Kuten kuvasta 30 voidaan havaita, pystysuuntainen kiihtyvyys on selkeästi suurempaa kuin poikittaissuuntainen kiihtyvyys, jolloin värähtelyn suhteen on perusteltua tutkia tässä ainoastaan sen suuruutta. Tämä pystysuuntainen kiihtyvyys on kuvan 30 mukaisesti hieman suurempaa pohjaimilla varustetulla eteläisellä raiteella. Pohjain siis hieman lisää sepelikerroksen kiihtyvyyttä suoraan raiteen alla. Suurempien amplitudien lisäksi värähtelymuoto raiteiden välillä on myös hieman erilainen, joten kiihtyvyyden vaikutuksia on syytä tarkastella myös taajuuteen perustuen. Kuva 31 havainnollistaa, kuinka suuria amplitudeja näiden edellä esitettyjen junien ylitys synnyttää eri taajuuksilla.



Kuva 31. Eteläisen (pohjain) ja pohjoisen (ei pohjainta) raiteen alla sepelitukieroksessa (kv -30 cm) syntyvä pystysuuntainen kiihtyvyys taajuuden suhteen ilmaistuna Sm5-junan ylittäessä kyseisiä raiteita.

Kirjallisuudesta löytyy monia määritelmiä sille, millä taajuudella runkomelua normaalisti esiintyy. Schmid (2010) on esimerkiksi kirjassaan todennut, että runkomelua esiintyy normaalisti taajuusvälillä 4-80 Hz, kun taas Lewis & Olofsson (2009) kertoo merkittävimpien runkomelutaajuuksien olevan alueella 4-50 Hz. Näiden tietojen pohjalta voidaan todeta, että runkomelun tarkastelun kannalta oleellista on tutkia amplitudeja, jotka syntyvät alle 80 Hz taajuuksilla. Kuva 31 osoittaa, että taajuuskaistalla 0-70 Hz eteläisen ja pohjoisen raiteen välillä ei ole merkittävää eroa, joten eteläiseltä raiteelta mitatut suuremmat kokonaiskiihtyvyydet eivät aiheuta kuitenkaan runkomelun lisääntymistä. Taajuuskaistalla 70-120 Hz esiintyvät eteläisen raiteen suuremmat amplitudit kertovat kuitenkin siitä, että pohjainten vaimentava vaikutus ei ole paras mahdollinen. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että valittu pohjain on jäykkyysarvoltaan kohtalaisen jäykkä (0,3 N/mm<sup>3</sup>), jolloin sen ominaisuudet eivät sovi nopeiden värähtelyjen vaimentamiseen.

Kuvien 30 ja 31 mukaiset kiihtyvyydet on mitattu suoraan raiteen alta, mutta värähtelyn merkittävyyden kannalta on syytä tutkia myös raiteiden välisestä mittauspisteestä saatuja tuloksia. Näistä nähdään, kuinka suuri osa värähtelystä lopulta etenee sepelikeroksessa. Alla on kuvassa 32 esitetty raiteiden keskeltä mitatut kiihtyvyyden arvot junien ajaessa sekä eteläistä että pohjoista raidetta.



Kuva 32. Eteläisen (pohjain) ja pohjoisen (ei pohjainta) raiteiden keskellä sepelikerroksessa (kv -30cm) syntyvä pystysuuntainen ja poikittaissuuntainen kiihtyvyys Sm5-junan ylittäessä kyseisiä raiteita.

Raiteiden keskeltä mitattuja kiihtyvyyksiä voidaan vertailla suoraan raiteen alta saatuihin tuloksiin, jolloin havaitaan, että pystysuuntaisen kiihtyvyyden arvot ovat pienentyneet huomattavasti jo tällä noin 2 metrin matkalla. Pystysuuntaisen kiihtyvyyden arvot eivät siis ainakaan tässä koekohteen rakenteessa etene kovinkaan tehokkaasti. Vaakasuuntainen kiihtyvyys ei ole vuorostaan vaimentunut juuri lainkaan, eli se etenee selkeästi paremmin sepelikerroksessa. Tässä koekohteessa sillä ei ole suurtakaan merkitystä, koska kiihtyvyyden lähtöarvokin radan alta mitattuna on todella pieni, mutta runkomelun ongelmakohteissa tämä havainto tulee ehdottomasti ottaa huomioon.

Junan kulun suhteen kauimmaisessa mittauspisteessä, eli viereisen radan alla, kiihtyvyyksissä ei ollut havaittavissa enää mitään muutoksia. Värähtely oli siis täysin vaimentunut tässä koekohteessa jo alle 5 metrin päässä värähtelylähteestä, mikä antaa viitteitä siitä, että runkomelun syntyminen läheisissä rakenteissa ei ole todennäköistä.



## 5 Johtopäätökset ja jatkotoimet

Edellisessä luvussa 4 on esitelty Kehäradan Asolassa sijaitsevien koevaihteiden seuranta- ja mittauksien tuloksia noin kahden vuoden ajalta vaihteiden säännöllisen liikenteen alkamisesta. Tätä hetkeä ennen vaihteissa on kulkenut jo useita Kehäradan rakentamisvaiheen aikaisia sepelivaunuja, joiden merkitys alkutilanteeseen pitää ottaa huomioon. Tällä kahden vuoden aikajaksolla pohjaimellisten ja pohjaimettomien vaihteiden käyttäytymisessä on jo havaittavissa tiettyjä eroja. Kirjallisuusselvityksen pohjalta tiedettiin jo ennen mittauksien suorittamista, että valittu pohjaintyyppi on ominaisuuksiltaan kohtalaisen jäykkä, joka tarkoittaa sitä, että se on parhaimmillaan geometrian pysyvyyden parantamisessa ja radikaalien jäykkyyserojen tasoittamisessa.

Palautuvan painuman mittaukset koevaihteissa osoittivat, että pohjaimettoman pohjoisen raiteen vaihteissa muutokset eri mittauksien välillä olivat radalla yleisesti todella pieniä, eli rakenteen keskiarvoinen palautuva painuma säilyi käytännössä vakiona seuranta- ja mittausjakson aikana (kuva 12). Yksityiskohtaisempi analyysi kuitenkin osoittaa, että näissä vaihteissa on useita hyvin pistemäisiä vain muutaman metrin pituisia ongelmakohtia, joissa palautuva painuma on muuttunut yli millimetrin eri mittauskertojen välillä. Näissä kohdissa palautuva painuma on ollut alusta asti suurempaa kuin eteläisen raiteen pohjaimellisissa vaihteissa ja aika on vain pahentanut tilannetta (kuva 16). Tämä on todennäköisesti seurausta siitä, että näitä alueita ei pystytä kunnolla tukemaan asennusvaiheessa, jolloin pohjaimettomien pölkkyjen kontaktipinta-ala sepeliin jää hyvin vajavaiseksi ja pölkkyt painuvat aggressiivisemmin heti ensimmäisten junien ylitysten aikana luoden rataa geometriavirheitä. Sama asennusvaiheen tukemisen ongelma on olemassa tietenkin myös pohjaimellisilla pölkkyillä, mutta pohjain varmistaa, että kontakti silti muodostuu tehokkaammaksi ajan saatossa.

Pohjaimia käytettäessä on kuitenkin hyvin tärkeää ymmärtää, että rakenteeseen muodostuu varsinkin elinkaaren alkupuolella huomattavasti enemmän pystysuuntaista liikkettä kuin pohjaimettomilla pölkkyillä. Pohjain on hitaasti muokkautuvaa materiaalia, joten se hakee lopullisen muotonsa vasta huomattavasti käyttöönoton jälkeen. Tämä on nähtävissä sekä palautuvan painuman kuvaajista (kuvat 13 ja 14) että pysyvän painuman taulukosta 3. Ensimmäisien kuukausien aikana pölkyn pystysuuntainen liike saattaa olla pohjaimellisessa rakenteessa jopa kaksinkertaista pohjaimettoman rakenteeseen verrattuna. Tämä ei ole silti millään tapaa huolestuttavaa, jos painumaa syntyy tasaisesti kaikkiin pölkkyihin, kuten näiden mittauksien perusteella voidaan sanoa tapahtuneen eteläisen raiteen vaihteissa.

Tämä pohjainpölkkyjen hidas asettuminen johtaa myös siihen, että näiden alueiden tukemista tulisi pohtia aina hyvin huolellisesti, sillä pohjaimen parhaat ominaisuudet tulevat esiin vasta pitkällä aikajänteellä. Mittauksien tulokset osoittavat, että puolen vuoden seurannan jälkeen pohjaimettomat pölkkyt olivat vielä pysyneet paremmin asemassaan kuin pohjaimelliset pölkkyt, mutta 1,5 vuoden seuranta- ja mittausjakson aikana tilanne oli jo kääntynyt toisinpäin. Nykyisessä pohjaimettomassa rakenteessa tukemisen voidaan aina olettaa parantavan tilannetta, koska pölkyn alle saadaan tiivistettyä uusia jauhaantumattomia sepelirakeita. Pohjaimellisen rakenteen kohdalla tukeminen ei kuitenkaan ole läheskään yhtä suosiollinen toimenpide, sillä pohjaimen toimivuus perustuu juuri pitkällä ajanjaksolla syntyneeseen kontaktiin tiettyjen sepelinrakeiden kanssa. Tukeminen, eli sepelirakeiden uudelleenjärjestely, kadottaa tämän tehokkaan kontaktin täysin, jolloin pohjaimen pitää muodostaa uusi kontakti sepelein kanssa ikään kuin alusta. Ja tämä prosessi saattaa jälleen viedä kuukausia, jonka aikana pohjaimellinen rakenne

on käyttäytymiseltään heikompi kuin pohjaimeton rakenne. Kaikki tämän projektin koevaihteet tuettiin 1,5 vuoden käytön jälkeen, jolloin seuranta-aika ei riittänyt havainnoimaan, alkaako pohjaimellinen rakenne jälleen tietyn ajan jälkeen käyttäytymään tehokkaammin kuin pohjaimeton rakenne.

Radan absoluuttigeometriaa mittaavan vaunun tuloksista voitiin havaita, että koevaihteiden poikkeavilla reiteillä on yksittäisiä kohtia, joissa korkeuspoikkeama (kuva 21) ja kallistus (kuva 22) ylittää hetkellisesti Kehäradan kunnossapitoluokan 1 mukaisen D-luokan virherajan 5 mm. Näiden huomioiden perusteella tukemisen voidaan siis ajatella olevan perusteltu toimenpide. Sen suorittamista tulee kuitenkin aina harkita pohjaimellisessa rakenteessa huolella yllä olevien syiden takia.

Vaihteen tukeminen vaikutti myös koevaihteiden risteyspölkkyjen taipuman mittaus-tuloksiin. Projektissa oli tarkoitus kahdella mittauksella selvittää, kuinka paljon risteyspölkkyjen rasiustila muuttuu kuormituksen alaisena seurantajaksolla, mutta marraskuussa 2016 tehty tuenta luonnollisesti muutti pölkkyjen tuentatilannetta kesken seurannan, jolloin jälkimmäisen mittauksen perusteella ei voida vetää kovin suuria johtopäätöksiä pölkkyjen pitkäaikaiskäyttäytymisestä. Tulokset antavat kuitenkin mahdollisuuden arvioida tuennan onnistuneisuutta. Tuloksista (taulukko 5) havaitaan, että tuennasta huolimatta varsinkin pohjaimellisten pölkkyjen taivutusmomentit olivat selkeästi kasvaneet risteyskärjen läheisyydessä. Tämä on todennäköisesti seurausta juuri siitä, että risteyskärjen leveyden takia tuenta on hyvin hankalaa, jolloin kuormituksen alla muokkaantunut pohjain ei ole pystynyt muodostamaan heti tuennan jälkeen yhtä tehokasta kontaktia sepeliin.

Kiskon kulumismittaukset osoittivat, että seurantajaksolla kiskot eivät ole kuluneet yhdessäkään koevaihteessa. Tulokset toivat kuitenkin ilmi, että muutamissa kielisovituk-sissa kielen absoluuttinen asema suhteessa tukikiskoon ei ole optimaalinen. Näissä koevaihteissa kielisovitusten kanta-alueella kielikisko on pahimmillaan 3 mm ylem-pänä kuin tukikisko, joka johtaa siihen, että pyörän siirtymäalue muodostuu väärään kohtaan kielisovitusta. Kielen liiallinen korkeus siirtää siirtymäaluetta kohti vaihteen kärkeä, jolloin kieli ei tässä uudessa kohdassa ole välttämättä vielä tarpeeksi leveä vas-taanottamaan yli 20 tonnin akselipainoja. Pelkkien hamarasta mitattujen profiilien avulla on kuitenkin hyvin vaikea arvioida, mistä tämä korkeusero johtuu.

Kaikkien yllä olevien johtopäätösten pohjalta voidaan todeta, että pohjaimien käyttö vaihderakenteessa on hyvinkin vartenotettava vaihtoehto. Vaihteiden muihin han-kinta- ja asennuskustannuksiin verrattuna pohjaimet eivät ole merkittävä sijoitus, mutta ne pystyvät silti tasoittamaan kuormituksia ratarakenteessa ja pienentämään painumia pitkällä aikajänteellä. Tämä ajan merkitys pitää siis ehdottomasti ottaa huo-mioon pohjaimien tehokkuuden arvioinnissa, sillä niiden hyödyt tulevat esiin vasta useita kuukausia asennuksen tai tuennan jälkeen. Kohteissa, jossa tuentatarve on suuri vaihteen ulkopuolella olevien syiden takia, pohjain saattaa olla jopa heikompi ratkaisu, kun pölkyn ja sepelin välinen rajapinta on tällöin jatkuvasti tehokkaan kontaktin hake-misvaiheessa.

Koevaihteiden tuennan takia pitkäaikaiskokemukset pohjaimien hyödyistä jäivät näissä seurantamittauksissa valitettavasti vajavaisiksi. Tästä syystä olisi ensiarvoisen tärkeää jatkaa seurantamittauksia vielä pidemmälle tulevaisuuteen. Tämä antaisi tärkeää kokemusta siitä, onko pohjain tehokas ratkaisu myös ensimmäisen kunnossapi-

totuennan jälkeen, kun kontakti sepelin ja pohjaimen välillä ajan mittaan paranee. Samalla olisi mahdollista miettiä myös uusia mittauskeinoja varsinkin kielen ja tukikiskon välillä havaitun korkeusongelman syiden selvittämiseksi.

## Lähteet

Auer, F., Potvin, R., Godart, P., Schmitt, L. 2013. Under Sleeper Pads in Track - the UIC project. European Railway Review, Issue 2, pp. 26-32.

Berggren, E. 2009. Railway Track Stiffness, Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance. Doctoral Thesis. KTH Engineering Sciences. 31 p.

Getzner. 2010. Sylomer Under Sleeper Pad SLB 3007 G. Datasheet. 2 p.

Getzner. 2013. Esittelytilaisuus Tampereen teknillisellä yliopistolla. 21.2.2013.

Lewis, R., Olofsson, U. 2009. Wheel-rail interface handbook. First Edition. Woodhead Publishing. Cambridge. 856 p.

Liikennevirasto. 2014a. Ratatiedon extranet, Asolan raiteistokaavio. [WWW] [Viitattu 3.3.2017] Saatavilla:

<https://rhk-fi-bin.directo.fi/@Bin/37a01f68a4dc92979f84d43659f017a4/1488537832/application/pdf/5276900/Asola.pdf>

Liikennevirasto. 2014b. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3, Radan rakenne. Helsinki. Liikenneviraston ohjeita 17/2014. 38 s. + liitt.42 s.

Luomala, H., Peltokangas, O., Rantala, T. & Nurmikolu, A. 2015. Radan kokonaisjäykkyyden mittaaminen ja modifiointi. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 19/2015. 112 s.

Luomala, H., Rantala, T., Kolisoja, P., Mäkelä, E. 2017. Assessment of track quality using continuous track stiffness measurements. Georail 2017, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Railway Geotechnical Engineering. Marne La Vallee. pp. 281-290.

Peltokangas, O., Luomala, H. & Nurmikolu, A. 2013. Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen pistemäinen mittaaminen. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 06/2013. 190 s. + liitt. 4 s.

Peltokangas, O. & Nurmikolu, A. 2015. Raidegeometrian kunnossapito tukemalla ja tukemiskalusto Suomen rataverkolla. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 23/2015. 132 s. + liitt. 10 s.

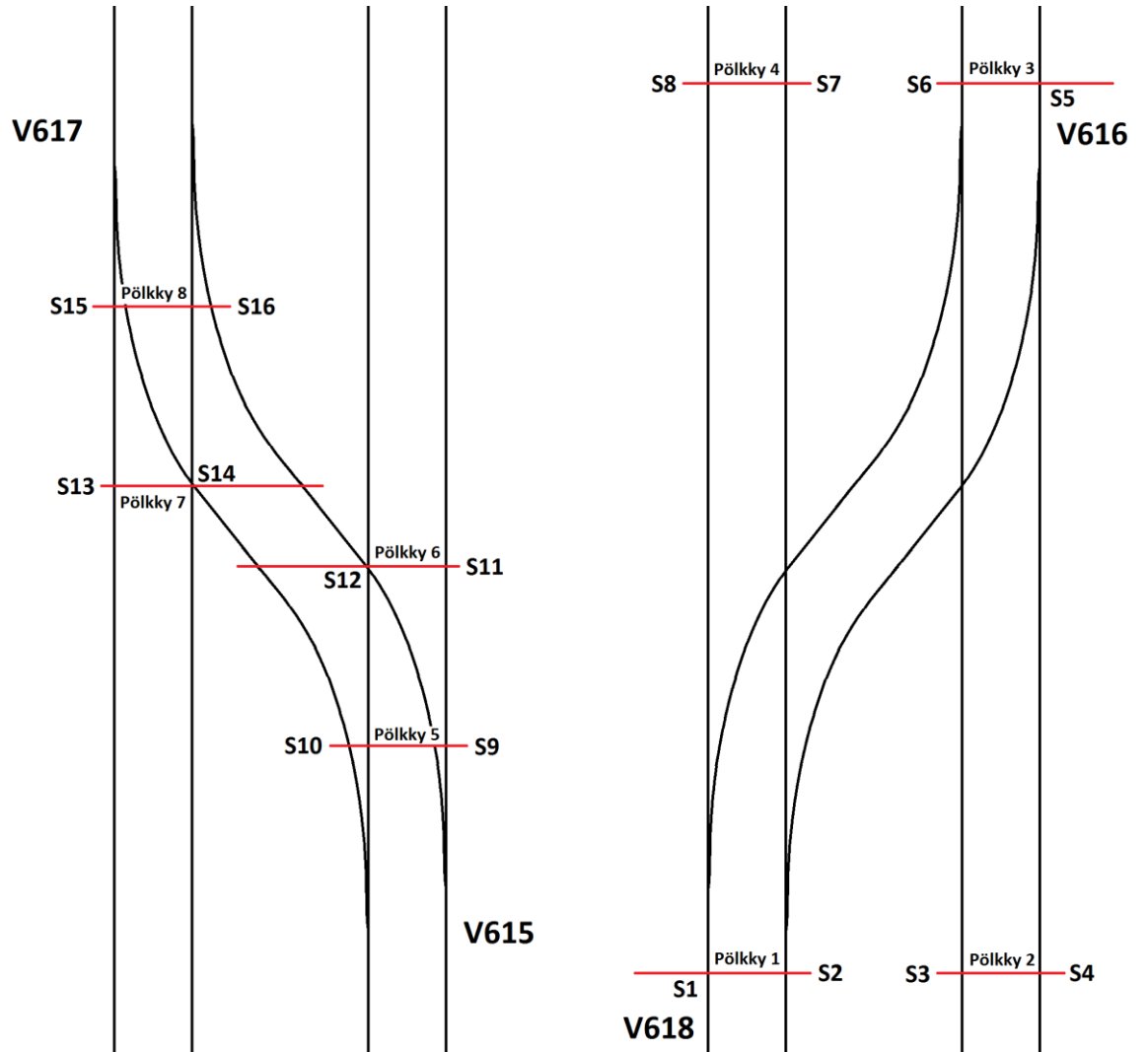
Proacon. 2012. RAMI-Wagon. [WWW] [Viitattu 8.11.2017] Saatavilla: <http://www.proacon.fi/palvelumme/mittaus-ja-laadunvalvonta/rautatieympariston-mittauspalvelut/>

Ratahallintokeskus 2008. Esijännitetyt betoniratapölkkyt. Tekniset toimitusehdot. 1942/042/2008.

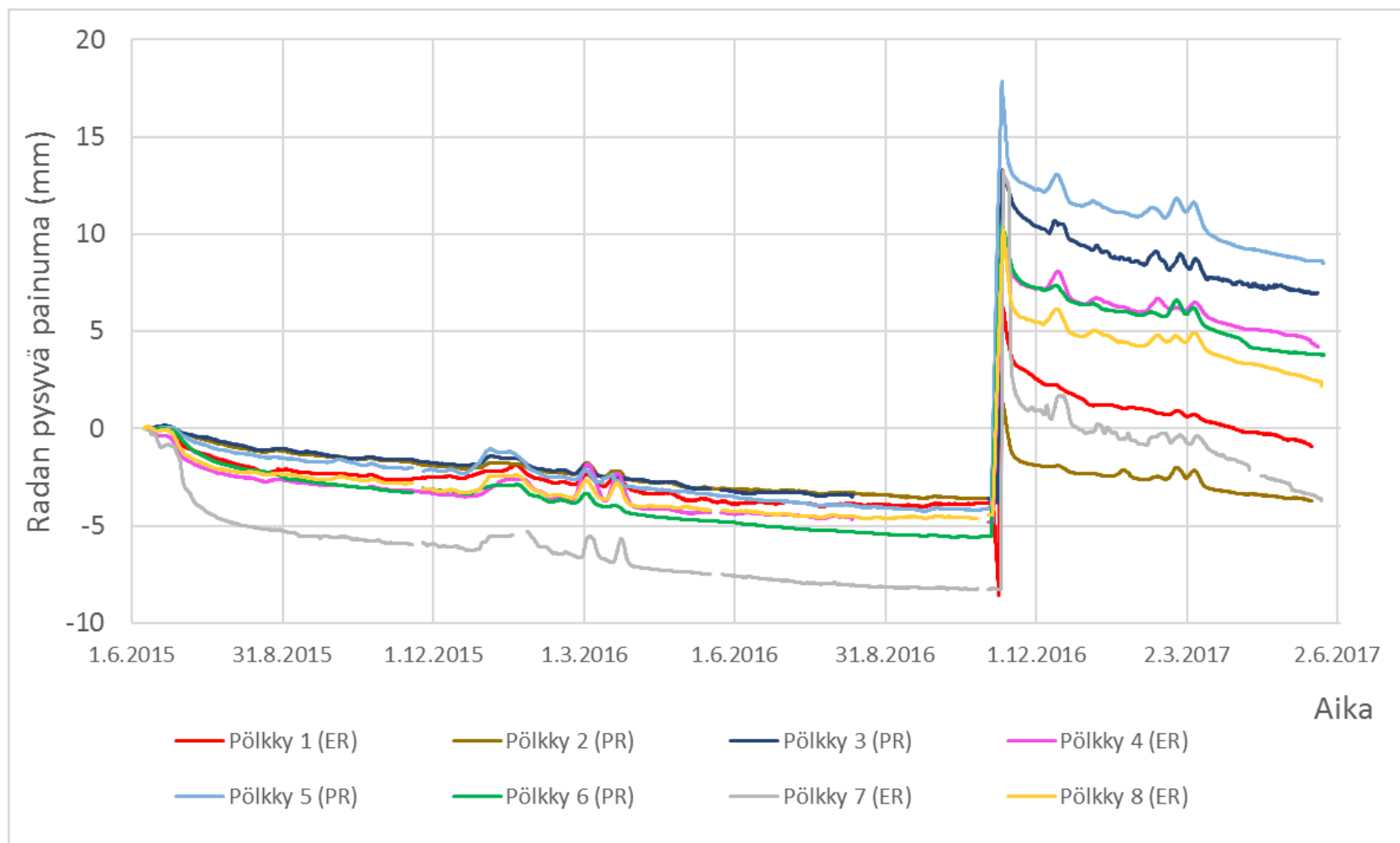
Schmid, F. 2010. Best Practice in Wheel-Rail Interface Management for Mixed Traffic Railways. First Edition. Birmingham. University of Birmingham Press, A & N Harris. 500 p.

Varis, R. 2017. Vaihterakenteiden pystysuuntaiseen jäykkyyteen liittyvät ongelmat ja niiden ratkaisuvaihtoehdot. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 9/2017. 86 s. + liitt. 3 s.

# Anturointisuunnitelma radan pystysuuntaisen painuman mittaamiseen



## Radan pysyvä painuma aikavälillä 6/2015–5/2017





ISSN-L 1798-6656  
ISSN 1798-6664  
ISBN 978-952-317-752-9  
[www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi)

Liik  
enne  
vira  
sto